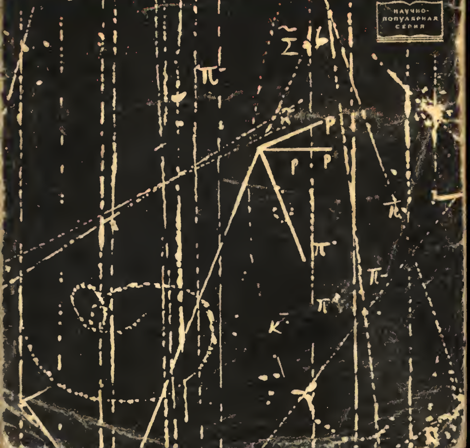
В ГЛУБЬ АТОМА



АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Научно-популярная серия

В ГЛУБЬ АТОМА

СБОРНИК СТАТЕЙ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» · МОСКВА 1964

Наш век не случайно называют веком атомной энергии. Человеку удалось заставить работать на себя атом — мельчайшую частицу вещества. Мельчайшую ли? Так думали еще несколько десятков лет назад. Теперь же ученые открывают все новые и новые элементарные частицы в атоме. О том, какими бурными темпами развивается наука об атоме, об успехах советских и зарубежных ученых, об использовании атомной энергии в мирных целях рассказывают в этой книге советские ученые.

Ответственный редактор
Д. А. Франк-Каменецкий

Редактор-составитель
Б. Н. Мацонашвили

ПРЕДИСЛОВИЕ

Недавно научно-популярному журналу Академии наук СССР «Природа» исполнилось 50 лет. Вот уже полвека «Природа» освещает в популярной форме достижения естественных наук, оказавших столь глубокое и всестороннее влияние на судьбы человечества. В работе журнала активно участвовали крупнейшие деятели русской и советской науки. В числе его руководителей были А. Е. Ферсман, С. И. Вавилов, О. Ю. Шмидт. Публикуемые в журнале статьи имеют не только временный интерес; они охватывают широкий круг проблем, длительно сохраняющих свою актуальность.

В связи с этим издательство «Наука» предприняло издание настоящего сборника, в который вошли статьи, напечатанные в последние годы в «Природе» по наиболее актуальным проблемам науки сегодняшнего дня: изучению атома и атомного ядра.

Всем известен выдающийся вклад советской науки в овладение энергией атомного ядра и завоевание космоса. Эти победы стали возможны на основе широкого развития различных областей науки, познающих природу как мельчайших частиц вещества, так и гигантских звездных систем. Предлагаемый вниманию читателей сборник дает общее представление об основных достижениях советской и мировой науки в первом из этих направлений.

В статье И. Е. Тамма в живой и популярной форме рассказывается о тех первичных кирпичах мироздания, из которых построено вещество и которые в современной физике называются элементарными частицами. Статьи С. Ю. Лукьянова и К. И. Щелкина вызвали в свое время

много откликов читателей журнала, отмечавших исключительно доступную форму изложения, которая позволяет понять основные идеи современной физики атома, зачастую отпугивающие своей непривычностью и сложностью. В статьях Я. А. Смородинского и Д. И. Блохинцева излагаются результаты исследования внутренней структуры элементарных частиц. Статья В. И. Гольданского посвящена открытию антивещества. В статье А. И. Базя и Л. Д. Пузикова дан общий обзор достижений физики ядра и элементарных частиц по материалам международных конференций. Ю. В. Новожилову удалось блестяще выполнить очень трудную задачу: популярно рассказать о том математическом аппарате, с помощью которого современная теоретическая физика описывает недоступные нашим наглядным представлениям законы микромира.

В статье В. Л. Гинзбурга и М. И. Фрадкина, а также в обзоре А. М. Кореца и З. Л. Понизовского говорится о космических лучах — частицах колоссальных энергий, прилетающих на нашу Землю из глубин космоса. С. А. Альтшулер рассказывает о найденном советскими учеными методе электронного парамагнитного резонанса, в котором тонкие свойства электрона используются для изучения самых различных процессов.

Последние годы ознаменовались бурным развитием физики твердого тела, на которую сильное влияние оказывают идеи и методы атомной и ядерной физики. Эта взаимосвязь важнейших отраслей науки отражена и в нашем сборнике. В статье И. М. Лифшица обосновывается понятие «квазичастицы», позволяющее внедрить в физику твердого тела основные представления физики элементарных частиц. В статье В. В. Миллера речь идет об эффекте Мессбауэра— явлении, в котором тончайшие эффекты ядерной физики (резонансное рассеяние гамма-лучей) проявляются в их взаимодействии с кристаллической решеткой твердого тела.

Б. М. Вул рассказывает о полупроводниках — той разновидности твердых тел, в поведении которых особенно ярко проявляются замечательные свойства электрона.

Статьи Н. Г. Басова, О. Н. Крохина, Ю. М. Попова и О. Н. Крохина посвящены достижениям новой отрасли науки и техники — квантовой радиофизики, которая,

исходя из теории атома и широко используя свойства твердого тела, пришла к созданию замечательных квантовых генераторов радиоволн и света («мазеры» и «лазеры»). Вторая статья автора и статья А. С. Компанейца посвящены представлениям о пространстве, времени и тяготении, вытекающим из общей теории относительности.

В первой из статей автора настоящего предисловия объясняется, как современная физика расширяет понятие температуры, так что становится возможным говорить о температурах «по ту сторону» абсолютного нуля. Эти теоретические представления позволяют подойти с другой точки зрения к упоминавшимся уже методам квантовой радиофизики.

Последние пять статей касаются экспериментальных методов ядерной физики и тех необъятных технических перспектив, которые она открывает. Л. А. Арцимович и С. Ю. Лукьянов рассказывают о грандиознейшей технической проблеме нашего времени — о возможностях овладения термоядерной энергией. Д. А. Панов и Н. Н. Семашко подробно описывают один из путей, предложенных для этой цели. В самое последнее время в этой области достигнуты новые важные успехи, частично отраженные в небольшой заметке автора настоящего предисловия. В. И. Котов и В. А. Петухов, А. А. Коломенский и М. С. Рабинович в двух статьях говорят о мощнейших орудиях экспериментальной ядерной физики — ускорителях заряженных частиц.

В настоящем сборнике статьи печатаются, как правило, в том виде, в каком они были помещены в журнале «Природа», с очень небольшими сокращениями. Дата опубликования указана в начале каждой статьи. Некоторой переработке подверглись только отдельные статьи (И. Е. Тамма и С. Ю. Лукьянова и др.). При таком принципе построения сборника неизбежна некоторая несогласованность между отдельными статьями. Так, одни и те же физические величины у разных авторов подчас обозначаются разными буквами. Некоторые вопросы повторно обсуждаются в нескольких статьях, но так как каждый автор подходит к их освещению со своей точки зрения, то такие «повторения» даже полезны. Отдельные статьи были написаны и опубликованы в связи со знаменательными датами (присуждением научных премий и т. п.). В таких случаях внимание уделяется не только научным результатам,

полученным в данной области, но и персонально самим ученым. Поскольку сборник отражает содержание журнала за определенный период, в нем, естественно, нашли место именно те знаменательные даты и события, которые пришлись на этот отрезок времени.

Не все статьи сборника одинаково доступны малоподготовленному читателю. Сравнительно более трудны для понимания статьи Д. И. Блохинцева и И. М. Лифшица. Большинство же остальных статей написано популярно и доступно самому широкому кругу читателей. Издательство намечает и в дальнейшем продолжать выпуск подобных сборников, что позволит держать читателей в курсе всех последних достижений науки.

Зам. главного редактора журнала «Природа»
профессор Д. А. ФРАНК-КАМЕНЕЦКИЙ

Элементарные частицы *

Академик
И. Е. Тамм

Когда я начинал заниматься физикой, около 50 лет назад, всем казалось несомненным, что есть две и только две элементарные частицы, два кирпича мироздания, из которых построены все вещества,— электрон и протон. Соответственно этому считалось, что все силы природы сводятся в конечном счете к электромагнитным и гравитационным (т. е. к силам тяготения).

Что называется элементарной частицей

Сейчас число элементарных частиц возросло примерно до 30, причем трудно указать критерий того, что мы называем «элементарной» частицей. Раньше этот критерий был чрезвычайно простым — ни электрон, ни протон нельзя было изменить путем какого бы то ни было химического или физического воздействия; отсюда вытекало убеждение, что эти частицы действительно элементарные. Однако не только большинство вновь открытых «элементарных» частиц через короткое время после возникновения самопроизвольно распадается, но и «стабильные» частицы, соударяясь друг с другом с достаточно большой энергией, могут превращаться в другие частицы или пол-

* Этот текст является переработанным и дополненным вариантом статьи, опубликованной в журнале «Природа» № 8 за 1960 г.

ностью аннигилировать (т. е. исчезать), переходя, например, в свет.

Могло бы показаться соблазнительным считать самопроизвольно распадающиеся частицы сложными и только нераспадающиеся — элементарными. Однако этот критерий явно непригоден. Так, например, нейтрон стабилен, когда он связан ядерными силами внутри атомного ядра (нерадиоактивного), но в свободном состоянии нейтрон в среднем за 17 мин. распадается на протон, электрон и нейтрино. Предположить, что протон, электрон и нейтрино предсуществовали в «недрах» нейтрона до акта распада, было бы столь же абсурдно, как считать, что электрон, который при своем движении может (например, при соударениях с другими частицами) излучать сколь угодно большое количество световых квантов, заранее содержит их внутри себя. Несомненно, что световые кванты рождаются в момент соударения электрона с другими частицами или при переходе его из одного энергетического состояния в другое. И хотя нейтрон распадается самопроизвольно, а не при столкновениях, возникающие при этом новые частицы, несомненно, рождаются только в момент распада. Таким образом, стабильность не может служить критерием элементарности частицы.

Есть ряд различных схем, пытающихся отобрать некоторое небольшое число «истинно элементарных» частиц и построить из них все остальные. Но пока ни одну из этих схем нельзя считать безусловно убедительной.

Однако мы принципиально не можем примириться с таким большим количеством независимых «элементарных» частиц. Мы убеждены, что будет найден общий закон, который позволит нам понять, почему в природе существует такое количество «элементарных» частиц, понять, чем обусловлены их разнообразные свойства и их взаимные превращения друг в друга. Другими словами, мы уверены, что появится единая теоретическая система, в которую четко уложатся известные уже частицы и которая сможет предсказать существование еще неоткрытых частиц или доказать, что таких частиц не должно быть. Но такой системы пока еще нет, и поиски ее сопряжены с трудностями фундаментального характера, непосредственно связанными с общими затруднениями современной релятивистской квантовой теории.

М. А. Марков [1] отметил парадоксальность того факта, что физики испытывают глубокую неудовлетворенность современным состоянием основ физической теории, хотя нет ни одного экспериментального факта, который противоречил бы существующей теории. Ни одного! Более того, ряд важнейших фактов был правильно предсказан теорией. Это показывает, что в современной теории несомненно существует здоровое ядро.

Чем же не удовлетворяет нас современная релятивистская квантовая теория? Почему физики считают необходимым создание новой теории и ищут пути к ней?

Точечные или протяженные частицы

В нерелятивистской квантовой теории все абсолютно ясно, замкнуто и последовательно. Напротив, если мы, пользуясь релятивистской (т. е. учитывающей требования теории относительности) квантовой теорией, вычисляем значения каких-либо физических величин (например, энергии взаимодействия частиц, положение спектральных линий и т. п.), то, как правило, получаем в результате вычислений бесконечно большую величину, что, безусловно, нелепо.

Причина этого частично заключается в специфических квантовых эффектах, частично же связана с предположением о точечности элементарных частиц. Так, потенциал электрического поля точечного заряда обратно пропорционален расстоянию от него и стремится к бесконечности при приближении к заряду. Энергия этого поля равна бесконечности. В классической теории избавиться от этой бесконечности очень легко. Для этого достаточно представить себе заряд не сосредоточенным в одной точке, а распределенным по сфере или шару конечного радиуса. Этот радиус можно выбрать так, чтобы вся масса электрона определялась энергией создаваемого электроном электромагнитного поля. Но по самой сути релятивистской теории такого рода предположение встречается с серьезнейшими трудностями. В самом деле, электрон конечных размеров (или любая другая элементарная частица) должен быть либо абсолютно жестким (и следовательно, его радиус должен оставаться совершенно неизменным),

[1] «Вопросы философии», 1958, № 4.

либо деформируемым телом. Первая возможность противоречит теории относительности. Ведь при столкновении двух абсолютно жестких тел толчок по всей «толще» каждого из этих тел должен был бы передаваться мгновенно, т. е. быстрее скорости света, что невозможно. Если же действие передается только с конечной скоростью, хотя бы и равной скорости света, то электрон должен быть деформируемым телом, так как близкие к месту соударения его части уже приобретут скорость под влиянием толчка, в то время как более отдаленные еще останутся в покое.

Следовательно, электрон конечных размеров должен представлять собой некую упругую среду, обладающую более или менее сложными механическими свойствами. Однако такого рода усложнение понятия элементарной частицы принципиально недопустимо хотя бы потому, что свойства макроскопических упругих тел объясняются, в свою очередь, взаимодействием электронов и атомных ядер, образующих собою эти тела.

Метод перенормировки

Выход из трудностей с бесконечностями был найден лет 15 назад, когда был развит так называемый метод перенормировки. Это своего рода рецепт, по которому из получающейся в результате вычислений бесконечной величины вычитается другая бесконечная величина так, чтобы их разность была конечной и равнялась наблюдаемой величине.

Несмотря на все остроумие этого способа, результаты которого к тому же в ряде случаев прекрасно согласуются с опытом, он встречает ряд возражений. Во-первых, по-видимому, существуют такие типы взаимодействия частиц, к которым метод перенормировки неприменим. Помимо этого, крайняя искусственность этого метода явно неудовлетворительна уже по одному тому, что он оперирует рядом принципиально ненаблюдаемых, выпадающих из конечных результатов понятий и величин. Никогда нельзя безнаказанно вносить в теорию не соответствующие реальности понятия. Вспомним хотя бы, как мучительно освобождалась теория света от понятия материального, но принципиально ненаблюдаемого светового эфира.

Совершенно ясно, что мы находимся накануне нового этапа развития физики, что те принципиальные трудности, которые стали возникать перед физической теорией по мере проникновения человека в новый, неизведанный мир элементарных частиц больших энергий, их взаимодействий и взаимных превращений, будут преодолены только на основе пересмотра и обобщения основных физических понятий и представлений. Этот пересмотр будет, несомненно, не менее радикальным, чем тот, который в начале нашего века привел к созданию теории относительности и квантовой теории.

Три вида взаимодействия

Сейчас известны три типа взаимодействия элементарных частиц [2]: сильное, электромагнитное и так называемое слабое, или распадное, взаимодействие. Сильное взаимодействие известно также под названием ядерных сил; эти силы, в частности, связывают между собой протоны и нейтроны, входящие в состав атомных ядер. Каждому типу взаимодействия соответствует свое поле и свои кванты этого поля. Электромагнитному взаимодействию соответствует электромагнитное поле и электромагнитные (световые) кванты — фотоны.

В 1934 г. я впервые указал на то, что всем типам взаимодействий, в том числе и ядерным, должны соответствовать определенные кванты поля, которые, подобно фотонам в электромагнитном случае, могут излучаться взаимодействующими частицами. Вместе с тем я показал, что единственно известные в то время (помимо фотонов) легкие частицы — электрон и нейтрино — не могут быть квантами поля ядерных сил. В следующем году Юкава в работе, начинающейся со ссылки на мою статью, не только предсказал существование своеобразных частиц — мезонов, являющихся квантами этого поля, но и правильно оценил их массу. В настоящее время известны уже два типа квантов, соответствующих сильному взаимодействию,— π-мезоны и K-мезоны.

Возникает вопрос, почему так долго эти ядерные силы не были обнаружены. Да просто потому, что, в отличие от

[2] Если не считать ультраслабого гравитационного взаимодействия, о котором здесь говориться не будет.

электромагнитных сил, у них очень малый радиус действия. Электромагнитные силы убывают, как квадрат расстояния между частицами, и ни о каком определенном радиусе действия для них, естественно, не приходится говорить. В то же время экспоненциальный [3] характер зависимости ядерных сил от расстояния (расстояние входит в показатель степени) позволяет определить радиус их действия, который оказывается порядка 10^{-13} *см*. Именно по причине малости этого радиуса действия ядерные силы, несмотря на то, что они в тысячи раз интенсивнее электромагнитных, проявляются только на незначительных расстояниях и поэтому были обнаружены сравнительно недавно, когда эксперимент позволил нам заглянуть внутрь атомного ядра.

Что касается третьего класса взаимодействия — слабого, которое проявляется главным образом при распаде частиц, то оно в 10^{11} раз слабее ядерных сил; вместе с тем очень мал и радиус действия этих сил.

Таблица 1

Виды взаимодействий

Вид взаимодействия	Кванты поля	Константа взаимодействия	Радиус действия, *см*
Сильное (ядерные силы)	π-мезоны *K*-мезоны	$g^2 \sim 14$ $g'^2 \sim 1$	$\sim 10^{-13}$ $\sim 10^{-14}$
Электромагнитное . . .	Фотоны	$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$	∞
Слабое (распадное) . .	(?)	$G^2 \frac{M^4 c^2}{\hbar^6} = 1{,}0 \cdot 10^{-10}$	$\sim 10^{-22}$

Из экспериментальных данных его можно приближенно определить примерно в 10^{-22} *см* (табл. 1). Вопрос же о природе квантов этого поля до сих пор дискуссионный. Существует гипотеза, что ими являются еще не обнаруженные на опыте так называемые векторные мезоны.

[3] Экспоненциальная функция — то же, что показательная функция типа $y = e^x$, где e — основание натуральных логарифмов.

Законы сохранения

Большую роль в систематике элементарных частиц играют законы сохранения, которые удобно разделить на строго соблюдающиеся, «строгие» (к которым относятся законы сохранения энергии и импульса, электрического заряда (e), ядерного заряда (N) и закон комбинированной инверсии), и на законы, нарушающиеся при некоторых типах взаимодействия, «приближенные» (табл. 2).

Таблица 2

Приближенные законы сохранения

Закон	В каких взаимодействиях нарушаются
Мир↔антимир (зарядовое сопряжение) Зеркальная инвариантность Сохранение странности	Только в слабых
Изотопическая инвариантность	В слабых и электромагнитных

В число строгих законов прежде всего входит известный закон сохранения энергии и импульса, а также закон сохранения электрического заряда. Несколько менее известен третий закон — закон сохранения ядерного заряда. Мы приписываем ядерным частицам, т. е. протонам, нейтронам и гиперонам, определенный ядерный заряд, которым не обладают другие частицы — фотоны, нейтрино, электроны и мезоны. Закон сохранения ядерного заряда гарантирует стабильность ядерных частиц. При любых превращениях элементарных частиц общая величина ядерного заряда должна сохраняться. Это одна из причин того, что, например, электрон (ядерный заряд нуль) и протон (ядерный заряд +1) не могут аннигилировать (превратившись, например, в фотоны, ядерные заряды которых равны нулю), хотя закон сохранения суммарного электрического заряда при этом не нарушался бы.

Четвертый закон сохранения — закон комбинированной инверсии — сформулирован впервые Л. Д. Ландау. Надо, однако, отметить, что этот закон пока проверен на опыте не столь исчерпывающим образом, как другие строгие законы сохранения [4].

[4] Закона сохранения лептонного заряда мы здесь не будем касаться.

Для того чтобы понять комбинированную инверсию, обратимся сначала к приближенным законам сохранения, нарушающимся в слабых взаимодействиях. Прежде всего рассмотрим так называемый закон зарядового сопряжения, или закон эквивалентности мира и антимира.

Частицы и античастицы

Наряду с каждой элементарной частицей существует соответствующая ей античастица с такой же точно массой, спином [5] и величиной электрического и ядерного зарядов, но с противоположным знаком этих зарядов. Электрону с отрицательным зарядом соответствует антиэлектрон с положительным зарядом, носящий название *позитрон.* Протону с положительными электрическим и ядерным зарядами соответствует отрицательно заряженный антипротон. Нейтрон не имеет электрического заряда, но, так же как и протон, имеет ядерный, и ему соответствует антинейтрон с противоположным знаком этого заряда. Самое существенное заключается в том, что при соударении любой частицы с соответствующей ей античастицей они могут аннигилировать, т. е. исчезнуть, причем их энергия и масса переходят, например, в излучение без нарушения законов сохранения.

Существование античастиц было предсказано Дираком, причем, по моему мнению, это один из самых замечательных в истории науки примеров научного предсказания. В качестве образца научного предвидения часто приводят открытие Леверрье и Адамсом планеты Нептун «на кончике пера», т. е. при помощи математического анализа неправильностей движения планеты Уран. Но при этом была открыта всего лишь новая планета, т. е. объект, вполне подобный ранее известным планетам. Когда же в 1931 г. выяснилось, что из электронной теории Дирака вытекает существование антиэлектрона, т. е. того, что мы

---

[5] Наглядно (хотя отнюдь не строго) спин можно представить себе как вращение частицы вокруг оси, проходящей через ее центр (подобно суточному вращению Земли). Количественно спин равен моменту количества движения этого «внутреннего» вращения частицы. Спин элементарной частицы каждого вида имеет строго постоянную величину; может изменяться только направление ее спина (т. е. направление ее оси вращения).

теперь называем позитроном, то никто не верил вначале, что такой принципиально новый тип вещества может реально существовать. Даже сам автор теории Дирак считал, что, если теория приводит к такому выводу, значит она неверна. Но через год позитрон был открыт экспериментально, и его свойства оказались точно такими, как предсказывала теория!

Сейчас античастицы известны почти для всех элементарных частиц. Исключением являются только фотоны и нейтральные π°-мезоны. Они тождественны своим античастицам.

Закон зарядового сопряжения заключается в том, что если исключить из рассмотрения слабое взаимодействие, то мир и антимир тождественны по своим свойствам, т. е. если все частицы заменить античастицами, то закономерности физических явлений не изменятся.

Как уже упоминалось, при взаимодействии частицы с соответствующей ей античастицей может произойти их аннигиляция, что и наблюдается на опыте. Если при ядерных превращениях (реакциях) выделение энергии на единицу массы в миллионы раз превосходит выделение энергии при обычных химических реакциях, то при аннигиляции вещества и антивещества выделение энергии (например, в форме излучения) в свою очередь в миллионы раз превышает ее выделение в ядерных реакциях. Поскольку при аннигиляции вся энергия реагирующих частиц полностью переходит в другие формы энергии, то аннигиляция есть максимально интенсивный из всех возможных источников энергии. Использовать эти процессы для практических целей мы пока не умеем. Но в астрономии теперь дискутируется вопрос о том, не состоят ли некоторые галактики из антивещества. При сближении какой-нибудь галактики с такой антигалактикой произойдет их бурная аннигиляция, причем их энергия и масса выделяются в форме излучения колоссальной интенсивности. Высказывались предположения, что именно такого рода процессы происходят в созвездии Лебедя, однако в этом конкретном случае гипотеза не подтвердилась. Весь этот вопрос крайне спорный, и я упомянул о нем только в качестве иллюстрации того значения, которое приобретает для астрономии теория элементарных частиц.

Нарушение закона четности

Однако закон эквивалентности мира и антимира, другими словами — закон зарядового сопряжения, нарушается при слабых взаимодействиях, что, как мы увидим, тесно связано с нарушением в этих взаимодействиях другого приближенного закона сохранения — закона зеркальной инвариантности (в квантовой теории его часто называют *законом сохранения четности*).

До самого последнего времени справедливость этого закона считалась самоочевидной. Ведь его можно свести, например, к утверждению, что законы вращения тела по часовой стрелке ничем не отличаются от законов вращения против часовой стрелки. Этому утверждению эквивалентно утверждение, что нет никакого объективного различия в свойствах (кроме чисто геометрических) буравчика с правовинтовой нарезкой и буравчика левовинтового. Ведь охарактеризовать, предположим, нарезку, которую мы условно называем правовинтовой, можно только путем демонстрации соответствующего образца или чертежа или путем сопоставления этой нарезки с каким-либо конкретным движением (например, с движением Солнца по небосводу).

Это равноправие «правого» и «левого» проявляется и в геометрии, когда мы, к примеру, вводим в ней три взаимно-перпендикулярных оси координат x, y, z. Мы называем систему координат правой, если с направлением ее осей x, y, z можно (в том же порядке) совместить (не согнутые, а распрямленные) большой, указательный и средний пальцы *правой* руки. Посредством левой руки определяются левые системы координат. Очевидно, что никаким поворотом правую систему координат нельзя совместить с левой и что вместе с тем обе эти системы совершенно равноправны.

Утверждение о равноправности «правого» и «левого» называется *законом зеркальной инвариантности* (или зеркальной симметрии) потому, что, рассматривая изображения предметов в зеркале, мы увидим, что часовая стрелка изменяет свое движение на обратное, правовинтовой буравчик становится левым и, наоборот, правая система координат тоже становится левой и т. д. Поэтому утверждение о равноправности правого и левого эквивалентно утверждению, что для мира, отраженного в зеркале, т. е. для мира, в котором правое и левое направления измени-

лись на обратные, действуют те же законы, что и для нашего мира, и нет возможности, находясь в каком-либо из миров, определить, прямой он или зеркальный. Иначе говоря, если вместо правой системы координат мы выберем левую (для этого нужно переменить условное направление одной из трех пространственных координатных осей на обратное), то в новой координатной системе все физические законы будут выражаться точно в такой же форме, как и в исходной. Это казалось настолько очевидным, что совершенно парадоксальным явился тот факт, что при слабых взаимодействиях закон зеркальной инвариантности нарушается, как было обнаружено в 1956 г.

В чем же выражается это нарушение?

Рассмотрим какое-нибудь вращающееся тело. Мы характеризуем его вращение вектором момента количества движения, направленным по оси вращения. Ось вращения определена однозначно. Однако оба взаимнопротивоположных направления вдоль нее совершенно равноправны. Поэтому направление момента вращения условно и зависит от произвольного выбора системы координат. Мы выбираем это направление по правилу правого буравчика; иначе говоря, так, чтобы при совмещении оси z *правой* системы координат с направлением вектора момента количества движения тела его вращение соответствовало бы повороту от (положительной) оси x к (положительной) оси y. Поэтому условное направление вектора момента изменяется на прямо противоположное при переходе от правой системы координат к левой или наоборот. Так как правые и левые системы координат равноправны, то отсюда следует, что в физических явлениях не может быть никакой корреляции (соотношения) между условным направлением вектора момента вращения частицы и, например, направлением вектора ее скорости, которое от выбора системы координат никак не зависит.

Однако корреляция именно такого рода была обнаружена в слабых взаимодействиях. Простейший пример: спин (т. е. внутренний момент вращения) электронов, испускаемых при радиоактивном β-распаде, направлен преимущественно противоположно их скорости. Такова корреляция в правых системах координат, в левых же системах вектор спина имеет противоположное направление и направлен по скорости электрона. Следовательно,

правые и левые системы координат оказываются неравноправными. Между ними имеется объективное различие (характер корреляции между спином и скоростью β-электронов).

Комбинированная инверсия

Этот факт парадоксален — казалось бы, что он свидетельствует о внутренней анизотропии пространства. Из числа различных попыток найти выход из этого положения несомненно наиболее удачна гипотеза Л. Д. Ландау о комбинированной инверсии, которую он предложил еще до того, как было экспериментально обнаружено несохранение четности.

Принцип комбинированной инверсии заключается в том, что, хотя взятые порознь законы эквивалентности мира и антимира и закон зеркальной инвариантности и не выполняются в слабых взаимодействиях, законы всех вообще физических явлений инвариантны по отношению к комбинированной инверсии, т. е. при переходе от мира к антимиру и *одновременном* зеркальном отражении.

Действительно, опыт показывает, что (в среднем) спин позитронов испускаемых при β-распаде атомных ядер направлен против их скорости, т. е. обратно спину электронов.

	Правая система	Левая система
β-электрон . . .	$s \leftarrow$	$\rightarrow s$
	$v \rightarrow$	$\rightarrow v$
β-позитрон . . .	$s \leftarrow$	$s \leftarrow$
	$v \leftarrow$	$\rightarrow v$

Поэтому, как видно из приведенной схемы, при комбинированной инверсии корреляция между спином s и скоростью v частиц не изменяется. Действительно, характер этой корреляции у электрона (частица) в правых системах координат такой же, как у позитрона (античастица) в левых системах, и наоборот. Заметим, что электрон и позитрон (как вообще частица и античастица) — совершенно равноправные частицы: заряды у них противоположного знака, но какой из них считать положительным, а какой отрицательным, совершенно безразлично — это вопрос терминологии. Поэтому если действительно существует строгая инвариантность относительно комбинированной инверсии, то о внутренней анизотропии пространства говорить не приходится.

Эта гипотеза Л. Д. Ландау уже нашла себе подтверждение в большом числе разнообразных экспериментов. Но из осторожности надо отметить, что пока еще не все типы слабых взаимодействий достаточно полно исследованы.

Систематика частиц

На основе этих законов можно перейти к систематике элементарных частиц (табл. 3 и 4). Все эти частицы делятся на два резко различных класса — фермионы, или частицы с полуцелым спином [6], и бозоны, или частицы с целым спином (в том числе и со спином нуль). В отличие от бозонов фермионы подчиняются принципу Паули, согласно которому два одинаковых фермиона не могут находиться в одном и том же состоянии (например, два электрона с одинаково направленными спинами не могут находиться на одной и той же орбите внутри атома). Совокупности фермионов и бозонов подчиняются совершенно различным статистическим закономерностям: в случае фермионов — так называемой статистике Ферми, а в случае бозонов — статистике Бозе.

Другой важнейшей характеристикой элементарной частицы является наличие или отсутствие у нее ядерного заряда, возбуждающего поле ядерных сил. Все известные нам частицы с ядерным зарядом обладают большей массой, чем любая известная нам частица, лишенная этого заряда. Неизвестно, принципиально ли это различие, но все же частицы, обладающие ядерным зарядом, принято называть барионами (что значит тяжелые).

В табл. 3 приведены данные о всех известных нам частицах, за исключением барионов, помещенных в табл. 4. Эти частицы подразделяются на три класса — фотоны, лептоны, или легкие фермионы (нейтрино, электрон и μ-мезон), и бозоны, переносящие ядерное взаимодействие (π- и K-мезоны). У двух частиц — фотона и нейтрино — масса покоя равна нулю. Поэтому они могут двигаться только со скоростью света. У двух частиц — фотона и нейтрального π^0-мезона — нет античастиц; точнее, они тождественны своим античастицам.

В табл. 3 и 4 указано время жизни различных частиц, точнее, время, за которое распадается в среднем

[6] Полуцелый спин — это спин, который, будучи выражен в долях постоянной Планка, равен целому числу с половиной.

Таблица 3

Частицы, не обладающие ядерным зарядом

	Частицы	Символ	Масса покоя*	Спин и статистика	Частица и античастица	Электрический заряд	Время жизни, сек.	Страиность	Примечаиие
	Фотон	γ	0	1, Бозе	Античастицы нет	0	∞	0	
Лептоны	Нейтрино . .	ν	0	1/2, Ферми	ν и $\tilde{\nu}$	0	∞	0	
	Электрон . . .	e	1	1/2, Ферми	e^- и e^+ (позитрон)	± 1	∞	0	
	μ-мезон . . .	μ	207	1/2, Ферми	μ^- и μ^+	± 1	$2 \cdot 10^{-6}$	0	
Мезоны	π-мезон	π	~ 270	0, Бозе	π^- и π^+	± 1	$2{,}5 \cdot 10^{-8}$	0	Изотопический триплет
					π^0 (нет античастицы)	0	$2 \cdot 10^{-16}$		
	K-мезон **	K	~ 970	0, Бозе	K^+ и K^-	± 1	10^{-8}	± 1	Изотопический дублет
					K^0 и $\tilde{K}^0$	0	$6 \cdot 10^{-8}$ и $1{,}3 \cdot 10^{-10}$	± 1	

Всего 14 видов

* Масса электрона принята за единицу.

** Два различных времени жизни, указанных для K^0, относятся не порознь к K^0 и анти-K^0, а к двум определенным комбинациям этих состояний.

Таблица 4

Барионы *

Частицы		Символ	Масса **	Частица и античастица	Электрический заряд	Время жизни, сек.	Странность	Изотопический мультиплет
Нуклоны	протон	p	1836	p и $\tilde{p}$	± 1	∞	0	Дублет
	нейтрон	n	1839	n и $\tilde{n}$	0	10^3	0	
Гипероны		Λ^0	2183	Λ^0 и $\tilde{\lambda}^0$	0	$3\cdot 10^{-10}$	± 1	Синглет
		Σ	~ 2310	Σ^+ и $\tilde{\Sigma}^+$ Σ^- и $\tilde{\Sigma}^-$ Σ^0 и $\tilde{\Sigma}^0$	± 1 ± 1 0	$\sim 10^{-10}$ $< 10^{-11}$	± 1	Триплет
		Ξ	~ 2560	Ξ^- и $\tilde{\Xi}^-$ Ξ^0 и $\tilde{\Xi}^0$	± 1 0	10^{-10}	± 2	Дублет
				Всего 16 видов				

* Все они фермионы и имеют ядерный заряд ± 1 и спин $^1/_2$.
** Масса электрона принята за единицу.

половина наличных частиц данного сорта; приведено время жизни свободных частиц [7].

В связанном же состоянии время жизни частиц изменяется; так, например, нейтроны, входящие в состав атомных ядер, вообще не распадаются, пока они под влиянием какого-либо внешнего воздействия не высвободятся из ядра.

Общее количество частиц и античастиц, представленных в обеих таблицах, равняется 30, из них 16 барионов. Нет никакой уверенности в том, что этим исчерпываются все существующие в природе элементарные частицы. Более того, уже в настоящее время имеются указания на то, что существует не один, а два вида нейтрино, отличающихся друг от друга по характеру их взаимодействия с другими частицами [8]. Есть также некоторые основания предполагать существование и ряда других видов частиц.

Еще более существен тот факт, что в самое последнее время — в 1961 и начале 1962 г.— открыт ряд так называемых резонансов, в которых по сути дела проявляется существование нового класса элементарных частиц, обладающих несравненно более коротким временем жизни, чем те гораздо лучше изученные частицы, которые приведены в табл. 3 и 4. Время жизни этих частиц (за исключением π^0-мезона и Σ^0-гиперона) не меньше 10^{-10} сек., тогда как вновь открытым «резонансам» соответствуют частицы, получившие название «ω-мезон», «ρ-мезон», «ξ-мезон» и т. д., которые самопроизвольно распадаются на два или три π-мезона за время порядка 10^{-23} сек.

Я не имею возможности входить здесь в более подробное рассмотрение этих новых частиц. Замечательно, что самый факт их существования, а также их свойства, по-видимому, могут быть поняты и объяснены на основании той теории S-матрицы, о которой будет идти речь в конце этой статьи.

---

[7] Конечно, и стабильные частицы (фотон, нейтрино, электрон, протон), время жизни которых в свободном состоянии бесконечно, могут исчезать и поглощаться или превращаться в другие частицы при соударениях друг с другом или с другими частицами.

[8] В 1962 г. со значительной степенью убедительности было экспериментально доказано существование двух видов нейтрино; испускание или поглощение нейтрино первого вида происходит при рождении или исчезновении электрона, тогда как нейтрино второго вида взаимодействуют не с электроном, а с μ-мезоном.

Новая теория Гейзенберга

Но и тех частиц, которые нам уже хорошо известны,— великое изобилие. Как уже было сказано вначале, главнейшая задача физики элементарных частиц — отыскание общих принципов, определяющих собой спектр элементарных частиц, их свойства и взаимодействия. Попыток в этом направлении делается много, но я рассмотрю только одну из наиболее интересных, принадлежащую одному из крупнейших современных физиков — Вернеру Гейзенбергу.

Известно, что классическому понятию электромагнитного поля в квантовой теории соответствуют фотоны, т. е. световые кванты. Подобно этому в современной теории каждому виду элементарных частиц соответствует свое «волновое поле», описываемое некоторыми «волновыми функциями» φ (x, y, z, t). Гейзенберг же исходит из концепции единого (спинорного) поля, лежащего в основе всех физических явлений и, так сказать, порождающего элементарные частицы всех сортов.

В качестве иллюстрации укажу только на то, что, например, π-мезон считается состоящим из пары «истинно элементарных» частиц — одного нуклона и одного антинуклона. Этой концепции отнюдь не противоречит тот факт, что масса π-мезона равна всего лишь 270 (считая массу электрона за единицу), тогда как масса нуклона и антинуклона, вместе взятых, равна 3700. Этот огромный «дефект массы» попросту характеризует величину энергии связи частиц в π-мезоне: при образовании этого мезона из нуклона и антинуклона должна выделяться энергия, связанная с дефектом массы соотношением Эйнштейна (энергия равна массе, помноженной на квадрат скорости света).

Почему единое, основное поле может «порождать» многочисленные волновые поля, соответствующие различным видам элементарных частиц? Это обусловлено тем, что в основное дифференциальное уравнение, определяющее это поле, волновая функция входит не в первой степени, т. е. линейно, а в более высоких степенях. Отсюда появилось название теории Гейзенберга — «нелинейная теория поля».

В работах Гейзенберга содержится много очень интересных качественных соображений, а также ряд

математических расчетов, подкрепляющих эти соображения. Однако необходимо иметь в виду, что в его работах до сих пор нет ничего твердо доказанного, нет, собственно говоря, никакой завершенной теории. Правильнее было бы говорить не о теории Гейзенберга, а о предложенной им, безусловно заманчивой, программе построения будущей теории. Правда, Гейзенбергу удалось получить из своей теории поразительные результаты: задавшись массой нуклона, он теоретически рассчитал массы почти всех остальных барионов и массы мезонов в хорошем согласии с данными эксперимента. Однако в эти расчеты не только входят некоторые дополнительные произвольно фиксируемые параметры, но вызывает сомнение как правомерность применяемого им приближенного метода расчета [9], так и последовательность и внутренняя непротиворечивость самих основ его теории. Кроме того, отнюдь не ясно, удастся ли, идя по намеченному Гейзенбергом пути, справиться с главной трудностью, стоящей перед всякой релятивистской квантовой теорией,— с устранением из нее бесконечностей. Кстати, для теории Гейзенберга эта задача представляет особые трудности; это явствует из того, что общепринятый (хотя и неудовлетворительный в принципиальном отношении) метод перенормировки, о котором я упоминал вначале, вообще к этой теории неприменим.

Гейзенберг надеется устранить бесконечности из своей теории путем введения в нее так называемой индефинитной метрики. Это означает следующее. Квантовая теория оперирует вероятностями различных событий; например, она позволяет определить, с какой вероятностью при известных условиях опыта электрон окажется находящимся в данном участке пространства. Вероятность — это положительная величина, лежащая в пределах от 0 до 1. В случае же индефинитной метрики те величины, которым в обычной квантовой теории приписывается смысл вероятности, могут приобретать и отрицательные значения. В связи с этим и некоторые из бесконечных величин, возникающих в процессе вычислений, приобретают знак,

[9] Я имею основание говорить о неприменимости к рассматриваемым Гейзенбергом проблемам используемого им метода расчета, так как этот метод был разработан мною (он известен в науке под названием метода Тамма—Данкова; Данков независимо от меня предложил его на 5 лет позже).

обратный обычному, и, таким образом, возникает возможность, что все эти бесконечности взаимно скомпенсируются. Однако далеко еще не ясно, совместима ли такого рода компенсация бесконечностей с тем совершенно необходимым требованием, чтобы вероятности всех реально наблюдаемых физических событий приобретали только положительное значение. Я сам тоже занимался этой проблемой, но мне не удалось получить какие-либо положительные результаты.

Хочу отметить, что когда Паули в 1958 г., приехав в США, докладывал о теории Гейзенберга, то присутствовавший на докладе Нильс Бор сказал: «Для новой теории теория Гейзенберга недостаточно сумасшедшая (crazy)!»

Конечно, термин «сумасшедшая» нужно при этом понимать не в том смысле, что новая теория будет непоследовательной и нелогичной. Напротив, она должна быть безупречно последовательной и логичной, а ее «сумасшединка» должна заключаться только в новизне ее идей, в их непривычности, вызывающей впечатление парадоксальности. Ведь и теория относительности и квантовая теория в свое время казались «сумасшедшими».

Я согласен с Бором, что заключающаяся в теории Гейзенберга «сумасшединка»— индефинитная метрика и отрицательные вероятности — действительно недостаточно радикальны и недостаточны для построения новой фундаментальной теории.

Тем не менее я сравнительно подробно остановился на теории Гейзенберга, во-первых, потому, что мне импонирует его идея об едином физическом поле, и, во-вторых, потому, что рассмотрение его теории дает известное представление об общем положении современной теории элементарных частиц.

Пересмотр пространственно-временных представлений

Я глубоко убежден, что создание новой фундаментальной теории потребует коренного пересмотра наших представлений о пространстве и времени в применении их к ультрамалым масштабам, пересмотра и видоизменения не менее радикального, чем то принципиально новое, что принесли с собой теория относительности и квантовая теория.

Еще Л. И. Мандельштам подчеркивал, что в атомарных масштабах понятия расстояния, измеряемого линейкой, и времени, измеряемого часами, неприменимы. В настоящее время становится все более вероятным, что даже при использовании любых косвенных методов измерения пространственное положение и момент времени *принципиально* не могут быть измерены с точностью, превышающей некоторый определенный предел. Конечно, с точки зрения наших обычных масштабов этот предел ничтожно мал; так, предел точности пространственных измерений никак не может превышать миллионной доли размера атомов. Однако все же какой-то определенный предел, по-видимому, существует. Но раз так, то самые *понятия точной* координаты и *точного* момента времени становятся *ненаблюдаемыми*, т. е. фиктивными, и, стало быть, не могут быть положены в основу изучения реального мира. Между тем современная физика оперирует этими, видимо фиктивными, понятиями, целиком базируется на них.

Можно следующим образом пояснить содержание этих утверждений. Известно, что в основе квантовой теории лежит принцип неопределенности. Обычно его формулируют так: невозможно в одно и то же время измерить, определить или вообще как-либо фиксировать и координату и импульс произвольного тела (для определенности в дальнейшем будем говорить о произвольной частице). Точнее говоря, благодаря тому, что любая частица обладает как корпускулярными, так и волновыми свойствами, она никогда не может находиться в состоянии, характеризуемом одновременно и вполне определенной точной координатой и вполне определенным импульсом; произведение неточности координаты на неточность импульса не может быть меньше постоянной Планка. Однако, согласно современной теории, точность значения каждой из этих величин — координаты и импульса, рассматриваемых порознь,— ничем не лимитирована; частица, например, может находиться в состоянии со сколь угодно точно фиксированной координатой, только в этом состоянии значение ее импульса будет соответственно весьма неопределенным.

В основе же новой теории, по моему мнению, будет лежать принципиальное ограничение возможной точности значения координаты, взятой самой по себе, вне зависи-

мости от импульса, а также, возможно, и точности значения импульса, тоже самого по себе.

Конечно, я вполне понимаю, что это только догадка, и хотя я мог бы привести ряд доводов в пользу нее, но шанс правильно угадать новое, очевидно, ничтожен.

Я говорю обо всем этом в статье, посвященной элементарным частицам, потому, что принципиальный предел точности измерений должен в первую очередь проявиться именно при исследовании элементарных частиц высоких энергий, их свойств и взаимодействий, их взаимных превращений. Представляется вероятным, что те основные проблемы теории элементарных частиц, о которых говорилось выше, могут быть разрешены только на основе новой физической теории.

Существует довольно много, правда большей частью весьма предварительных, попыток пересмотра наших пространственно-временны́х представлений. Так, например, ряд физиков (в частности, Снайдер, 1947; Койш, 1959; Кадышевский, 1961) считает, что в ультрамалых масштабах пространство окажется не непрерывным, как мы всегда его себе представляем, а дискретным, т. е. состоящим из отдельных, четко разграниченных точек. Я понимаю, что такого рода предположение должно на первый взгляд представляться нелепым, но пояснить его за недостатком места не могу.

Довольно долгое время я увлекался этим направлением исследования, но в настоящее время я склоняюсь к мысли, что решение вопроса будет найдено на другом пути, о котором я кратко расскажу.

Дисперсионные соотношения и теория S-матрицы

То направление, которое в настоящее время доминирует в теоретической физике,— это исследование так называемых дисперсионных соотношений. Оно основано на исследовании математических свойств различных функций, описывающих физические явления, при продолжении этих функций в комплексную область. Это значит, что хотя физический смысл имеют только вещественные (а не мнимые) значения таких величин, как энергия или скорость частицы, тем не менее анализируется поведение

частиц при (конечно, никогда в действительности не реализующихся) комплексных значениях этих величин.

На этом пути получены очень ценные результаты, относящиеся непосредственно к реальным процессам.

Однако в оценке перспектив дисперсионной теории мнения физиков расходятся и сейчас. В последние 3—4 года Л. Д. Ландау был одним из наиболее ярких проводников идеи, что на основе аппарата дисперсионных соотношений может возникнуть новая фундаментальная физическая теория. Я же вместе с рядом других теоретиков считал, что дисперсионная теория носит в значительной мере феноменологический характер, что каждый ее шаг требует введения в нее все новых параметров, значения которых не предсказываются теорией, а берутся из опыта, и что поэтому ее несомненные успехи отнюдь не решают основной задачи — создания новой, последовательной, внутренне замкнутой физической теории, базирующейся на ограниченном числе общих принципов и постулатов.

Однако в 1961 — начале 1962 г. появился ряд очень важных работ, весьма существенно подкрепивших концепцию Л. Д. Ландау. Эти успехи связаны в первую очередь с именами И. Я. Померанчука и В. Н. Грибова в нашей стране и с именами Редже, Чью, Геллмана и другими за рубежом.

Я не имею возможности излагать здесь те новые (очень сложные в математическом отношении) методы и новые результаты, которые пробудили надежду, что, наконец, найден правильный путь, который, как можно рассчитывать, приведет физику к желанной цели. Ограничусь только самыми общими замечаниями [10].

---

[10] В 1962 — начале 1963 г. произошли драматические события: сначала некоторые парадоксальные предсказания этой теории (о рассеянии быстрых протонов под малыми углами) были подтверждены на опыте, а затем выяснилось, что в других процессах (рассеянии π-мезонов на протонах) предсказания теории не подтверждаются. Как бы дальше ни развивались события, но даже установление противоречия между теоретическими предсказаниями и экспериментом (которых, как я говорил в начале статьи, нам так долго не хватало) оказывает все же плодотворное влияние на развитие теории, указывает путь дальнейших поисков — ведь, например, теория относительности возникла на основе анализа противоречия между результатами опыта Майкельсона и предсказаниями классической теории.

Переход от классической физики к квантовой был связан с уяснением того факта, что хотя и можно наблюдать траекторию движения быстрого *свободного* электрона (например, в камере Вильсона), однако самое понятие траектории электрона теряет смысл при рассмотрении электронов, находящихся в электронной оболочке атомов (как известно, это связано с наличием у электрона наряду с корпускулярными свойствами также и волновых свойств).

Подобно тому как квантовая теория ограничила применимость понятия классической траектории частиц, так находящаяся в стадии становления новая теория базируется на предположении, что и представления современной квантовой теории (в частности, описание явлений с помощью так называемых волновых функций и операторов) не применимы к соударениям и взаимодействиям частиц очень высоких энергий. Точнее говоря, предполагается, что детали поведения частиц при их сближении до очень малых расстояний *принципиально* не наблюдаемы. Единственно с чем должна оперировать теория взаимодействия частиц больших энергий — это так называемая S-матрица, определяющая вероятность того или иного *результата* соударения частиц, т. е. позволяющая вычислить вероятность того, какие именно частицы с какими энергиями и направлениями движения возникнут в результате соударения частиц заданной начальной энергии и заданными направлениями движения. При этом структура S-матрицы в существенной мере определяется требованиями, вытекающими из дисперсионных соотношений.

Несмотря на несомненную обоснованность оптимистических надежд, связанных с развитием новой теории, эта теория находится еще в начальной стадии развития и, что важнее всего, в ней еще пока не сделано главное — не найдена система тех общих принципов (подобных аксиомам Ньютона в классической механике или уравнениям Максвелла в электродинамике), из которых однозначно вытекали бы все положения теории.

Нельзя предсказать, когда и как будет создана новая последовательная физическая теория, включающая в себя в качестве частных случаев и квантовую теорию и классическую физику. Но тот факт, что громадная армия экспериментаторов и теоретиков во всем мире работает на этом передовом для физики фронте, позволяет надеяться, что это время не за горами.

Основные представления экспериментальной ядерной физики*

Доктор физико-математических наук
С. Ю. Лукьянов

В наши дни достижения атомной физики все шире используются в повседневной жизни. Радиоактивные элементы, естественные и искусственно приготовленные, все чаще применяются не только в медицине и биологии, но и во многих отраслях народного хозяйства, все больший размах принимает строительство атомных электростанций (как известно, первая в мире атомная электростанция была построена в Советском Союзе).

Разумеется, эти достижения научной и технической мысли не возникли внезапно, без подготовки, совершенно неожиданно. Понадобился более чем полувековой напряженный и самоотверженный труд двух или трех поколений ученых во всем мире, чтобы перейти от первых смутных догадок, абстрактных теорий и противоречивых опытов к практическим результатам и техническим достижениям.

По сути дела, ученые впервые столкнулись с процессами, относящимися к физике ядра, еще в 1896 г., когда французский физик Беккерель открыл явление радиоактивности. Однако само понятие атомного ядра возникло значительно позднее, и в первых опытах по исследованию радиоактивности было много странного и загадочного.

* «Природа», 1955, № 3.

XIX век для химии был периодом крупнейших успехов. Великому Менделееву удалось расположить в стройную систему первичные химические элементы, из которых построены все известные нам вещества окружающего мира. Многие неизвестные до того элементы были открыты на основе предсказаний, сделанных Менделеевым при помощи его периодического закона. Химики научились синтезировать огромное количество новых веществ, как органических, так и неорганических. Успешно развивалась созданная Бутлеровым теория химического строения органических соединений. Путеводной нитью в этих работах было представление о существовании первичных тождественных частиц — атомов химических элементов, из комбинации которых создается все беспредельное разнообразие химических соединений. С другой стороны, те же атомистические представления использовались физиками еще со времен Ломоносова для объяснения свойств газов. Развившаяся позднее механическая теория тепла также основывалась на атомных представлениях и сводила нагревание тел к более быстрому движению атомов, из которых построено данное тело.

Все эти успехи химии и физики до начала XX века не были, однако, подкреплены прямыми опытами, в которых были бы установлены свойства отдельных атомов. Представления об атомах были лишены конкретности. Размер и вес атомов оставались неизвестными. Было ясно, что капля воды состоит из множества молекул H_2O, но не было известно, сколько именно таких молекул содержится в капле. Атомы никем не наблюдались в изолированном состоянии; поведение их оставалось никому неведомым, а вопрос о внутреннем строении отдельного атома даже не возникал.

В конце концов атомы были взвешены, сосчитаны и их размеры были определены. Здесь нет возможности останавливаться на описании всех, очень интересных, тонких и остроумных опытов, которые были проделаны с этой целью, — это завело бы нас слишком далеко. Напомним только, что размеры и веса атомов ничтожно малы, а число их, даже в небольших объемах вещества, огромно. Например, вес атома меди составляет $1 \cdot 10^{-22}$ *г*, его поперечник около $1 \cdot 10^{-8}$ *см*, в 1 *см*^{3} меди содержится $8 \cdot 10^{22}$ атомов.

После определения числа и размеров атомов естественно возник вопрос, как же устроен отдельный атом, каковы его составные части, что он содержит.

Здесь пришли на помощь сведения из области учения о свете и электричестве. Уже в конце XIX века было с несомненностью установлено, что свет представляет собой электромагнитные колебания. Но для испускания электромагнитных колебаний необходимо, чтобы в излучателе двигались электрические заряды. Если какое-то тело, состоящее из множества атомов, испускает свет, то это означает, что излучающие, светящиеся атомы должны работать подобно миниатюрным радиостанциям и, следовательно, должны содержать электрические заряды. Количество положительных и отрицательных зарядов в атоме должно быть одинаково, так как вещество в обычных условиях электрически нейтрально. О величине этих электрических зарядов удалось получить сведения, изучая явление электролиза. Каждый атом в процессе электролиза переносит вполне определенную порцию электрического заряда. Этот элементарный заряд — атом электричества — оказывается неимоверно малым; величина заряда составляет $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ кулона.

Замечательно, однако, что в изолированном, чистом виде существуют только атомы отрицательного электричества, т. е. то, что мы теперь называем электронами. Элементарные положительные заряды, взятые в отдельности, не существуют — они связаны с обычными атомами [1]. Вскоре после открытия электрона была измерена его масса. Электрон оказался приблизительно в 1840 раз легче самого легкого из существующих атомов — атома водорода.

Но как же все-таки устроен атом? Распределены ли положительные и отрицательные заряды в атоме в виде равномерной смеси? Или в атоме есть какой-то организующий центр, существует какая-то упорядоченная структура?

Для решения этих вопросов надо располагать каким-то новым инструментом, неизмеримо более тонким, чем все

---

[1] Напомним, что сейчас идет речь об экспериментальных данных, которыми располагала физика атома на рубеже XIX и XX веков. В дальнейшем наши сведения, относящиеся к этой области, обогатились, расширились, а во многом и изменились. Так, помимо отрицательного электрона, было доказано существование положительного электрона; внутри атома, помимо заряженных частиц, как оказалось, содержится незаряженная элементарная частица — нейтрон. О свойствах этих и других частиц, открытых в недавние годы, будет сказано в дальнейшем.

те орудия, которые были изобретены человеком до сих пор. Такой инструмент был разыскан. Его нашли при изучении явлений радиоактивного распада.

Атомы не бессмертны

Открытие радиоактивности Беккерелем носило в известной мере случайный характер. Узнав в начале 1896 г. о первых опытах Рентгена с новым родом лучей, действующих на фотопластинку и проникающих через непрозрачные для обычного света экраны, он обратил внимание на ту часть сообщения Рентгена, в которой говорилось, что испускание этих лучей из вакуумной трубки сопровождается ярким зеленоватым свечением стекла трубки — так называемой флюоресценцией. Сам Беккерель давно интересовался флюоресценцией, и у него возникла мысль, что именно свечение стекла является причиной возникновения лучей Рентгена, природа которых в то время была загадочна. Теперь нам известно, что его предположение было ошибочно, но оно привело к тому, что Беккерель начал поиски похожего излучения среди обширной коллекции минералов.

По счастливой случайности Беккерель воспользовался для своих опытов минералом, содержащим соединения урана, и обнаружил, что этот минерал испускает невидимые лучи, проходящие через черную бумагу и действующие на фотографическую пластинку. Флюоресцирует при этом минерал или нет — это оказалось совершенно несущественным. Вскоре выяснилось также, что ответственным за излучение является сам уран, а не его соединение, так как наиболее интенсивное почернение фотопластинки вызывали куски чистого металлического урана. Замечательная особенность излучения, открытого Беккерелем, состояла в том, что оно совершенно не зависело ни от каких внешних условий и происходило с неизменной интенсивностью изо дня в день без всякого видимого ослабления.

Помимо фотографического действия, лучи Беккереля обладают и другими интересными свойствами, в частности, способны сделать проводящим — ионизировать — окружающий воздух. Открытие Беккереля вызвало большой интерес и привело к появлению новых исследований в той же области. Среди других изучением радиоактив-

ности занялась Мария Склодовская — в те годы начинающий химик. Она начала систематические поиски других веществ, обладающих подобно урану способностью к испусканию нового рода лучей. Спустя два года было обнаружено, что этим свойством обладает элемент торий, а еще через некоторое время М. Склодовская натолкнулась на неожиданное обстоятельство — оказалось, что некоторые образцы урановых руд обладают большей активностью, нежели чистый уран.

С этого времени М. Склодовская начинает работать вместе со своим мужем, французским физиком Пьером Кюри, и продолжает изучение радиоактивности на протяжении всей своей жизни.

Сделав совершенно правильное предположение, что повышенная активность урановых руд указывает на присутствие в их составе небольшой примеси какого-то неизвестного вещества с излучающей способностью, во много раз превосходящей уран, супруги Кюри начали поиски этого неведомого вещества. Труд, потраченный на эту работу, продолжавшуюся четыре года и проходившую в плохо приспособленном, неудобном помещении, при недостатке средств и почти без помощников, был огромен. Достаточно сказать, что в процессе выделения радиоактивной примеси Пьер и Мария Кюри переработали несколько тонн руды. Но труд их был вознагражден — в примесях руды были открыты два новых радиоактивных химических элемента, заполнивших две пустые до того клетки системы Менделеева,— полоний и радий. Радиоактивность радия в миллионы раз превышает радиоактивность урана, что неизмеримо облегчает исследование явления.

Так же как и в случае урана, самая замечательная особенность радия состоит в его способности непрерывно вырабатывать энергию. В час 1 *г* радия выделяет 140 малых калорий тепла; это не очень большое количество: пришлось бы ждать свыше месяца, прежде чем накопилась бы энергия, достаточная, чтобы довести до кипения чайник воды. Но эта энергия выделяется непрерывно — за годы наблюдения не было замечено никакого ослабления этого процесса.

Энергия выделяется радием в виде лучей, имеющих сложный состав. Пропуская пучок таких лучей между заряженными пластинами, можно обнаружить, что весь этот

пучок делится на три части. Одна часть совершенно не отклоняется электрическими силами. Эти лучи, названные гамма (γ)-лучами, подобно лучам Рентгена, являются электромагнитными колебаниями очень малой длины волны. Лучи, притягиваемые положительно заряженной пластиной, состоят из отрицательно заряженных частиц и являются быстро летящими электронами (так называемые бета (β)-лучи). Наконец, третья часть лучей отклоняется к отрицательно заряженной пластине; они состоят из положительно заряженных частиц, названных альфа (α)-частицами.

Какова же природа альфа-частиц? Это было выяснено при помощи следующего опыта. Радиоактивный препарат, помещенный в запаянную стеклянную трубочку с очень тонкими стенками, был заключен в другую закрытую трубку с массивными стенками. Альфа-частицы, вылетающие из радия, проходили через тонкие стенки внутренней стеклянной трубки, но задерживались в наружном сосуде. Бета- и гамма-лучи проходили через стенки обоих сосудов и рассеивались в окружающем пространстве. Воздух из наружной и внутренней трубок перед началом опыта был тщательно откачан. Однако по мере того как проходило время и «вырабатываемые» радием альфа-частицы проходили в наружный сосуд, стало заметно, что в этом сосуде появляются следы какого-то газа. Обнаружили это по свечению трубки, по появлению в ней газового разряда при пропускании электрического тока.

Изучая спектр накапливающегося газа, удалось определить его состав, хотя количество полученного газа было ничтожно мало. Оказалось, что этим газом является инертный газ— гелий. Таким образом, альфа-частицы — это, по-видимому, просто быстро летящие ионизированные атомы гелия. Но откуда же может взяться инертный газ в нашем приборе, когда там находится только щелочноземельный металл — радий, похожий по своим химическим свойствам на кальций или стронций, но никак не на гелий?

Казалось, загадка радиоактивности запутывается все больше и больше. Но именно установление природы альфа-лучей привело физиков к гипотезе о превращении атомов, которая, разрушив старые представления о вечности атома, вместе с тем позволила объяснить радиоактивные явления.

3*

Время от времени атомы радия самопроизвольно распадаются с вылетом альфа-частицы. Этот процесс сопровождается выделением энергии. Темп радиоактивного распада радия очень медленный, поэтому мы не замечаем ни уменьшения веса радиоактивного препарата, ни уменьшения количества ежечасно выделяющейся энергии (за время в 1600 лет распадается половина взятого количества радия).

Как может быть проверена высказанная гипотеза? Прежде всего надо уточнить, что представляет собой остаток атома радия, который получается после вылета альфа-частицы. Это было сделано при помощи методов спектрального анализа. Оказалось, что во внутренней трубке с радием также накапливается газ, инертный подобно гелию, но гораздо более тяжелый. Этот газ ранее не был известен, он, так же как и радий, является радиоактивным и назван поэтому радоном. Таким образом, распад радия может быть записан в виде следующего равенства:

$$\text{радий} \rightarrow \text{радон} + \text{гелий}.$$

Но если написанное равенство справедливо, то неизвестный атомный вес вновь открытого элемента радона должен равняться разности атомных весов радия (226) и гелия (4). Атомный вес радона был определен на опыте и оказался равным 222. Так гипотеза радиоактивного распада выдержала первое испытание.

В дальнейшем прямыми опытами с пучками альфа-частиц было доказано, что масса каждой альфа-частицы совпадает с массой атома гелия и что она несет двойной элементарный заряд, т. е. является действительно двукратно ионизированным атомом гелия. Была измерена также скорость альфа-частиц, которая составляет несколько десятков тысяч километров в секунду.

Итак, изучение радиоактивности заставило физиков прийти к выводу о разрушимости атомов, а открытие альфа-частиц дало им в руки тот тонкий инструмент, который был пригоден для дальнейшего анализа структуры атома. Этот анализ был предпринят английским физиком Резерфордом в опытах, начатых им в 1911 г.

Ядро атома

Если выпустить через узкую щель пучок альфа-лучей, исходящий от крупинки радия, то на флюоресцирующем экране, расположенном перед щелью, получится яркое и достаточно резкое изображение этой щели. Альфа-частицы ударяются об экран и вызывают свечение экрана. Совершенно таким же способом вызывают свечение экрана телевизионного приемника бомбардирующие его электроны.

Рассматривая свечение, возникающее на экране, при помощи микроскопа с небольшим увеличением, легко убедиться, что это свечение состоит из отдельных крохотных звездочек, отдельных вспышек, которые загораются и немедленно гаснут. Каждая вспышка (или сцинтилляция) свидетельствует о попадании отдельной альфа-частицы в экран. Ограничивая поле зрения и применяя для опытов ничтожное количество радия, можно сосчитать, сколько вспышек появляется на экране при его облучении данным количеством радия, скажем, за одну минуту.

При помещении на пути альфа-частиц тонкой металлической фольги (например, из меди, золота или свинца) основная доля потока альфа-частиц лишь незначительно отклоняется от своего первоначального направления, но в среднем на каждые несколько тысяч частиц находится одна частица, которая отклоняется сразу очень сильно — на прямой угол или даже назад. В чем причина этого резкого изменения траектории частицы? Альфа-частицы летят с огромной скоростью — около 20 тысяч *км* в секунду. Единственная причина, которая может вызвать столь резкое изменение их пути — это появление каких-то огромных сил, отбрасывающих частицы в сторону. Но что зто за силы? Мы знаем, что альфа-частица несет с собой положительный заряд, равный двойному элементарному заряду, и что это — атом гелия, лишенный двух электронов. Если бы в атомах мишени, с которыми сталкиваются альфа-частицы, отрицательные заряды электронов и положительные заряды были распределены более или менее равномерно, то нигде внутри атома не могли бы возникнуть огромные электрические силы. Это было бы так же невозможно, говорит Резерфорд, как невозможно для пули отскочить от листа бумаги. Иное дело, если положительный заряд сосредоточен в небольшом объеме, скажем, в центре атома. Тогда альфа-частица, приближаясь достаточно близко к этой положи-

тельно заряженной сердцевине — ядру атома, должна испытывать все более и более сильное отталкивание. Ведь, по закону Кулона, одноименные заряды отталкиваются с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, и на достаточно малом расстоянии эта сила была бы достаточной для отклонения даже столь быстро движущейся частицы.

То обстоятельство, что в нашем примере из нескольких тысяч альфа-частиц в среднем только одна отскакивает в обратном направлении, связано с тем, что лишь очень редко альфа-частица проносится достаточно близко от ядра. Следовательно, само ядро занимает очень маленькую часть всего объема атома. Действительно, поперечник ядра примерно в 50 тысяч раз меньше поперечника атома. Таким образом, из рассмотренных опытов складывается представление, что атом состоит из положительного ядра, расположенного в центре, а электроны образуют облако или своеобразный хоровод частиц, «пляшущих» вокруг ядра. Такая схема устройства атома напоминает устройство солнечной системы в миниатюре. Роль Солнца играет ядро, роль планет — электроны, которые часто так и называются «планетарными».

Надо было, конечно, все-таки доказать, что эта привлекательная картина действительно справедлива, и доказать с безукоризненной строгостью. Явление рассеяния альфа-частиц вполне пригодно для этой цели. Можно рассчитать, как должны двигаться альфа-частицы, проносясь мимо ядра, а затем сравнить результат вычислений с опытом, в котором изучается, в какие точки экрана попадут альфа-частицы, отклоненные электрическим полем ядра. Что касается вычислений, то сделать их было нетрудно, так как закон, по которому взаимодействуют заряженные частицы,— закон Кулона — по своей математической форме не отличается от закона всемирного тяготения Ньютона. Только силы между одноименно заряженными частицами отталкивательные, а не притягательные. Результаты опытов, трудных и длительных, удовлетворили бы самого придирчивого критика. Согласие с теорией было безукоризненным и не оставляло ни малейших сомнений в том, что атом состоит из положительно заряженного ядра, находящегося в центре атома, и расположенных вокруг него электронов.

Так возникла знаменитая ядерная модель атома.

Нам нужно выяснить еще несколько важных вопросов. Прежде всего, каков положительный заряд ядра? Это удалось установить в опытах с рассеянием альфа-частиц в фольгах из различных материалов. Оказалось, что чем больше порядковый номер химического элемента в периодической системе Менделеева, тем сильнее отклоняется альфа-частица. Более точные опыты позволили прямо установить, что заряд ядра, выраженный в единицах элементарного заряда, совпадает с порядковым номером элемента в периодической системе. Так еще раз проявилась руководящая сила периодического закона, открытого Менделеевым.

Итак, ядро первого элемента таблицы Менделеева — водорода — имеет заряд, равный +1 (все в тех же единицах элементарного заряда), ядро гелия +2, ядро лития +3 и т. д. вплоть до последнего из имеющихся на Земле в естественных условиях элементов — радиоактивного урана, заряд ядра которого равен 92 положительным элементарным зарядам. Разумеется, вокруг каждого из ядер от водорода до урана располагается соответствующее число электронов, которые делают атом в целом нейтральным.

Когда атом радия, распадаясь и испуская ядро гелия (альфа-частицу), превращается в радон, порядковый номер радия уменьшается на две единицы, а масса его — на четыре единицы. Поэтому более подробно химическое уравнение, описывающее альфа-распад радия, может быть записано следующим образом:

$$_{88}Ra^{226} \rightarrow {}_{86}Rh^{222} + {}_{2}He^{4}.$$

Вообще при альфа-распаде любого элемента порядковый номер получающегося элемента уменьшается на две единицы, а при бета-распаде, когда заряд ядра за счет вылета одного электрона увеличивается на единицу, получающийся элемент имеет на единицу больший порядковый номер и попадает в следующую клетку периодической системы.

Изучая ядерную модель атома, физики столкнулись с новым серьезным затруднением, носившим исключительно глубокий характер. При всей привлекательности ядерной модели, несмотря на блестящее согласие с опытом и на успешное толкование периодической системы, эта модель находилась в резком противоречии с основными фактами

из области учения об электричестве и механике. Ядерная модель неустойчива. Электрон, кружась вокруг ядра, движется с ускорением, так как направление его скорости непрерывно меняется. Поэтому, как всякий движущийся ускоренно электрический заряд, он должен излучать электромагнитные колебания. Но если электрон, вращаясь вокруг ядра, излучает электромагнитную энергию, то это значит, что эту энергию он теряет. Иными словами, начинается процесс торможения, и электрон должен упасть на ядро (совершенно так же Земля упала бы на Солнце под влиянием огромных сил тяготения, если бы она перестала нестись по круговой орбите со скоростью 30 *км* в секунду). Но, может быть, процесс «падения» электрона на ядро продолжается достаточно долго? К сожалению, нет. За время в одну миллиардную долю секунды электрон должен упасть на ядро, и наша с таким трудом построенная система разлетается, как карточный домик.

Итак, либо атом устроен иначе, либо недопустимо применять основные и простейшие законы механики и электромагнетизма к атомным системам. Дальнейшее развитие физики показало, что ядерная модель справедлива, а законы механики и электромагнетизма здесь неприменимы. Этот переворот в представлении физиков связан с развитием теории, которая получила название квантовой механики. Уверенность в справедливости законов классической механики основывалась, конечно, на опыте исключительно богатом и разнообразном. Но весь этот опыт относится только к поведению объектов достаточно большого размера. Когда мы проникли в мир атомных явлений, где естественные масштабы длин и времени уменьшились в сотни миллионов раз, не удивительно, что эти количественные изменения сказались в глубоких качественных переменах. Здесь нет возможности останавливаться на том революционном перевороте в наших представлениях, который был вызван созданием квантовой механики. Укажем лишь, что ее влияние на толкование атомных процессов остается огромным от момента открытия квантовых законов и до наших дней.

Применяя законы квантовой механики, которые значительно менее наглядны, чем законы механики классической (так как новая механика — это механика малых величин, очень далеких от нашего обычного жизненного опыта), мы приходим к полному согласию с картиной

атома, состоящего из центрального положительного ядра и наружной электронной оболочки.

Электронная оболочка, окружающая положительное ядро атома, представляет собой сравнительно сложное образование. Если у водорода, где вокруг ядра движется один электрон, законы его движения, установленные при помощи квантовой механики, оказались сравнительно простыми, то уже, например, у лития поведение трех планетарных электронов различно. Два из них образуют внутреннюю оболочку, сравнительно тесно связанную с ядром и не подверженную изменениям при обычных химических процессах. Третий, внешний, или, как его называют, валентный, электрон определяет всю полноту химических свойств данного атома и большинство физических свойств элемента. По мере увеличения порядкового номера элемента и числа планетарных электронов структура оболочки все усложняется и усложняется. Так, у натрия имеются уже две внутренние заполненные оболочки с двумя и восемью электронами и одним наружным валентным электроном. Именно это сходство наружного электронного «одеяния» и приводит к химической близости элементов лития и натрия — оба являются типичными щелочными металлами. Исключительная сложность электронных оболочек элементов с большими порядковыми номерами видна на примере урана. Его 92 планетарных электрона группируются так: 2 электрона расположены на ближайшей к ядру оболочке, 8 — на второй, 18 — на третьей, 32 — на четвертой, 21 — на пятой, 4 — на шестой и 2 — на седьмой оболочке.

Продолжим, однако, рассказ о свойствах атомных ядер и остановимся подробнее на вопросе о массе ядра.

Из опытов Резерфорда мы убеждаемся, что заряды ядер одного и того же элемента тождественны, так как судьба отлетающей альфа-частицы определяется на основе индивидуального взаимодействия данной частицы с данным ядром. Но соответствующих опытов, в которых было бы доказано, что веса всех атомов данного сорта совершенно одинаковы, не было.

Если в трубку, из которой выкачан воздух, ввести поток ионов лития (атомов лития, лишенных валентного электрона) и ускорить их при помощи высокого напряжения, то они становятся пригодными для дальнейшего изучения и «взвешивания» индивидуальных атомов. Допустим,

что ионы лития пропускаются между полюсами электромагнита. Тогда, если ионы лития имеют одинаковый заряд (в этом мы совершенно уверены) и имеют одинаковую массу (это мы хотим проверить), то все ионы будут вести себя совершенно одинаково, будут двигаться по тождественным путям — по окружностям определенного радиуса. Если же массы ионов различны, то более массивные частицы, которые труднее заставить свернуть со своего пути, будут двигаться по окружности большего радиуса, а более легкие — по окружности меньшего радиуса.

Описанный опыт был действительно проделан и показал, что у лития существуют два сорта атомов. Их массы не очень сильно отличаются одна от другой: атомы лития одного сорта почти точно в шесть раз тяжелее атомов водорода, атомы другого сорта — в семь раз. Все атомы лития очень похожи друг на друга, у них совершенно одинаковые электронные оболочки, но массы ядер различны.

Литий не является исключением: существуют два сорта атомов хлора, пять сортов атомов цинка, десять сортов атомов олова. Даже у водорода мы сталкиваемся с двумя сортами атомов: один — обычный, другой — с массой вдвое большей. Правда, содержание тяжелого водорода очень мало: на 5 тысяч атомов обычного легкого водорода приходится один атом тяжелого водорода. Атомы данного элемента, отличающиеся по массе, но занимающие, конечно, одно и то же место в периодической системе, называются изотопами (по-гречески исос — одинаковый, топос — место). В настоящее время известно более 280 устойчивых или долгоживущих изотопов элементов, встречающихся в природе.

Открытие изотопов привело к установлению еще одного важного факта. Оказалось, что веса изотопов очень близки к целым кратным веса легкого атома водорода. Так, атомные веса изотопов лития почти точно равны 6 и 7, хлора — 35 и 37, меди — 63 и 65 и т. д. Это правило соблюдается для всех без исключения изотопов и, разумеется, не может считаться случайностью. Вывод напрашивается сам собой. Если веса атомов в целое число раз превышают вес атома водорода, а следовательно, и ядра этих атомов во столько же раз тяжелее ядер водорода (ведь нам известно, что основная масса атома сосредоточена в ядре), то не состоят ли ядра всех атомов просто из тесно сбли-

женных ядер водорода, т. е. протонов? Одного этого допущения, однако, недостаточно. Этим можно объяснить целочисленность веса ядер, но остается еще объяснить величину заряда. Если, скажем, ядро золота состоит из 197 протонов (атомный вес золота равен 197), то оно должно иметь заряд, равный сумме всех зарядов протонов и, следовательно, занимать 197-е место в системе Менделеева. В действительности золото занимает 79-е место, и, следовательно, ядро должно содержать 197—79=118 электронов, чтобы скомпенсировать избыточный положительный заряд ядра. Итак, простая картина, к которой пришли физики на основе описанных фактов, сводится к следующему: ядро содержит число протонов, равное атомному весу данного атома. Вокруг ядра движутся планетарные электроны в числе, равном порядковому номеру. Внутри ядра должны содержаться остальные электроны, компенсирующие избыточный положительный заряд ядра и обеспечивающие нейтральность атома в целом. Эта модель ядра была общепринятой в течение долгого времени и лишь в начале тридцатых годов была отброшена в связи с новыми открытиями.

Современная алхимия

Исследование радиоактивности показало, что атомы не являются вечными и неизменными образованиями, истинно неделимыми атомами древних философов. Но при изучении явлений радиоактивности мы оставались еще пассивными и безучастными зрителями тех грандиозных событий, которые разыгрывались в недрах атомных ядер. Самое сильное нагревание или охлаждение, огромные давления, наиболее энергичные химические реактивы, самые сильные электрические и магнитные поля ни в какой мере не влияли на темп радиоактивного распада. Причины этого обстоятельства, очевидно, могут заключаться лишь в одном, — в наличии исключительно прочной связи ядерных частиц. Если все же существует возможность вмешательства в ядерные процессы, то применяемые средства должны быть несравненно более мощными, чем те, которыми мы пользовались до сих пор. Напрашивается естественная мысль воспользоваться теми снарядами атомной артиллерии, альфа-частицами, которые уже применялись для зондирования структуры атома. Соответст-

вующие опыты были проделаны в 1919 г. Резерфордом. Мы опишем эти опыты, но не в их первоначальной форме, а в более наглядном виде с использованием одного из наиболее замечательных приборов современной физики — камеры Вильсона.

Если воздух, насыщенный водяными парами, начинает быстро остывать, то появляется туман. Вечерние туманы над рекой, туманы в сырые осенние и зимние дни имеют именно такое происхождение. Но для выпадания тумана нужны какие-то центры конденсации, на которых могли бы оседать микроскопические водяные капельки — капельки тумана. Этими центрами могут служить, например, частицы дыма. Поэтому так часто и легко образуются туманы в запыленной и дымной атмосфере больших городов. Наряду с частицами дыма и пыли, превосходными центрами конденсации могут также служить заряженные частицы — ионы любого вещества. Это обстоятельство и используется в камере Вильсона. Если в объеме камеры (цилиндрической коробке с металлическими стенками и стеклянным дном), насыщенной водяными парами, произвести резкое расширение, выдвигая поршень, то газ, наполняющий камеру, охладится и в камере появится облачко тумана. Если, однако, камера тщательно очищена от следов пыли и случайных ионов, то при незначительном охлаждении туман в объеме камеры не будет образовываться. Но достаточно пустить в объем камеры быструю заряженную частицу, например альфа- или бета-частицу от радиоактивного препарата, как она, пронизывая газ камеры, произведет на своем пути ионизацию, создав вдоль него центры конденсации. Теперь капельки тумана начнут выпадать вдоль пути частицы, образуя туманный след.

На рис. 1 изображен в увеличенном виде один из таких следов.

Охотник легко различает следы пробежавшего зверя на свежевыпавшем снегу. Рассматривая отпечатки этих следов, он может сказать, какому зверю они принадлежат; по расстоянию между следами он может сказать, быстро или медленно двигалось животное. Так и физик, изучая следы частиц в камере Вильсона, получая фотоснимки туманных полосок, может рассказать о свойствах пролетевшей частицы и описать ее судьбу. Он может вычислить заряд частицы, найти ее скорость, он видит направление



Рис. 1. След частицы в камере Вильсона. Благодаря большому увеличению отчетливо видны отдельные капельки тумана — центры конденсации, возникающие около ионизированных молекул газа, наполняющего камеру

ее полета и знает, чем заканчивается ее движение. Помещая камеру между полюсами магнита, можно искусственно искривлять траекторию частицы и получать еще более богатую информацию о ее свойствах.

Чем быстрее движется частица, чем больше ее энергия, тем более длинный путь она сможет проделать в камере Вильсона прежде чем израсходует весь запас энергии на образование ионов на своем пути. Конец следа указывает на точку, в которой скорость частицы сделалась настолько малой, что она уже не способна более к образованию ионов.

След пути быстрой частицы в большинстве случаев строго прямолинеен. Лишь изредка, подлетая достаточно близко к ядру, частица резко меняет направление полета. С этим мы уже сталкивались, рассматривая явление рассеяния альфа-частиц. Однако иногда может произойти еще более редкое и несравненно более замечательное событие — при лобовом столкновении достаточно быстрой частицы с ядром она может проникнуть в ядро и вызвать ядерное превращение.

Одно из таких событий запечатлено на рис. 2. Из огромного числа альфа-частиц, проходящих через азот, наполняющий камеру Вильсона, одна частица осуществила превращение ядра азота в ядро изотопа кислорода с испусканием протона, обладающего большой энергией. Превращение происходит в ничтожных масштабах, в среднем всего лишь одна альфа-частица из 50 тысяч приближается достаточно близко к ядру, чтобы быть им захваченной. Пришлось сделать снимки сотен тысяч следов альфа-частиц в наполненной азотом камере Вильсона, чтобы зарегистрировать несколько отчетливых случаев превращения. Происходящий процесс можно записать кратко в виде соотношения, напоминающего

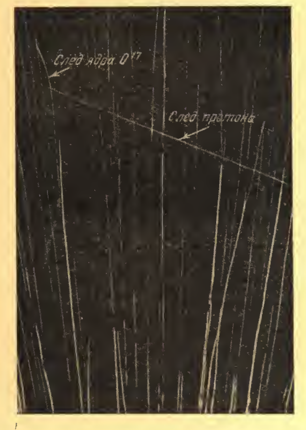


Рис. 2. Расщепление ядра азота α-частицей. Среди множества прямолинейных следов α-частиц, вылетающих из радиоактивного источника (внизу под рисунком), виден один след, заканчивающийся «вилкой». Короткий, более жирный след принадлежит ядру O^{17}, более тонкий, длинный след принадлежит протону

химическое уравнение:

$$_7N^{14} + {}_2He^4 \rightarrow {}_8O^{17} + {}_1H^1.$$

Здесь левая часть уравнения содержит вступающие в реакцию элементы, а правая — конечные продукты превращения.

Итак, азот, соединяясь с гелием, превращается в кислород и водород. Какое бессмысленное утверждение с точки зрения химика XIX века!

Два числа, написанные около каждого символа химического элемента, так же как и раньше, обозначают массу ядра данного изотопа и его заряд. Общий заряд ядер при их превращениях сохраняется совершенно точно.

Остановимся теперь подробнее на вопросе о массе. Здесь дело обстоит несравненно сложнее. Как уже было сказано, массы ядер являются почти точно целыми кратными массы ядра водорода. Приблизительно баланс масс, как это видно из написанного уравнения, выполняется, но только приблизительно. Опыты по отклонению ускоренных частиц в известном магнитном поле позволяют определить веса отдельных атомов с очень большой точностью. И вот оказывается, что масса частиц, вступающих в данную ядерную реакцию, меньше массы частиц, получаемых после нее. Различие небольшое, примерно на 0,2% массы протона, но оно лежит далеко за пределами возможных ошибок опыта и совершенно бесспорно.

Полученный результат должен иметь фундаментальное значение, поскольку он касается одного из основных законов физики — закона сохранения массы.

Подобно тому как для объяснения причин устойчивости ядерной модели атома пришлось выйти за рамки привычных представлений классической механики, так и в этом случае необходимо подвергнуть глубокой ревизии самые основные понятия классической физики. Такой пересмотр системы взглядов классической физики был осуществлен в начале этого века теорией относительности, созданной Эйнштейном. Одно из величайших достижений этой теории состоит в установлении того факта, что законы сохранения массы и энергии нельзя рассматривать как изолированные законы — они находятся один с другим в глубокой связи. Энергия неразрывно связана с массой, и если в результате некоторой ядерной реакции закон сохранения массы кажется нарушенным, то это получается лишь потому, что мы игнорируем происходящие одновременно изменения энергии.

В общем случае связь между изменением энергии и изменением массы выражается простой формулой:

$$\Delta E = c^2 \Delta m,$$

здесь Δm — изменение массы, ΔE — изменение энергии и c — скорость света (300 000 *км* в секунду).

Вернемся к рассматриваемому примеру. Мы уже сказали, что масса всех частиц, принимающих участие в реакции, известна с большой степенью точности. Точно так же может быть очень точно измерена кинетическая энергия α-частицы (обозначим эту величину через E_1) и кинетическая энергия разлетающихся ядер (E_2 и E_3). Тогда уравнение баланса масс, если верна написанная основная формула теории относительности, должно быть записано в следующей форме:

$$m_\alpha + m_{N^{14}} + \frac{E_1}{c^2} = m_{H^1} + m_{O^{17}} + \frac{E_2}{c^2} + \frac{E_3}{c^2}.$$

Согласие между теорией и опытом получается безукоризненное.

Возникает, однако, совершенно естественный вопрос, почему в обычных условиях, скажем, при изучении химических реакций, мы не замечаем этой убыли массы, взвешивая продукты реакции на самых точных аналитических весах. Потому, что эти изменения очень малы, и большие с точки зрения обычных масштабов энергетические изменения отвечают ничтожному изменению массы. Только в ядерных явлениях, когда энергетические изменения поистине огромны, возникающие «дефекты массы» оказываются доступными измерению.

Следующий простой пример делает наглядной ту количественную связь, которая существует между изменениями энергии и массы. При сжигании платформы угля убыль массы вещества составляет около 0,005 *г*. Иными словами, на долю тепла, возникающего при этой химической реакции, приходится примерно одна пятимиллиардная доля всей массы угля.

Связь между энергией и массой, установленная теорией относительности, позволяет разъяснить еще одно важное обстоятельство. Как уже было сказано, веса атомов отдельных изотопов почти в точности равны целому кратному от веса водородного атома. Однако полное совпадение здесь все же отсутствует. Веса ядер отдельных изотопов несколько меньше суммарного веса протонов и электронов, из которых должно быть построено данное ядро. Такая нехватка, «дефект массы» большей или меньшей величины, была обнаружена при точных измерениях масс

ядер вдоль всей периодической системы. Причины этого явления теперь нам понятны. Когда атом углерода сгорает, соединяясь с двумя атомами кислорода и образуя молекулу углекислого газа, выделяется заметное количество тепла. Чем больше тепла выделяется в химической реакции, тем прочнее соединяются атомы в химическую молекулу. Можно сказать, что теплота реакции служит мерилом энергии связи, характеризует силы, удерживающие атомы вместе. Ядра атомов являются неизмеримо более прочными образованиями, чем химические молекулы. Поэтому дефект массы, ускользающий от наблюдения при изучении химических реакций, с легкостью обнаруживается в мире ядерных явлений.

Когда в опытах Резерфорда ядра азота превращаются в ядра кислорода и протоны, часть энергии летящей альфа-частицы расходуется на это превращение, так что сумма энергии разлетающегося протона и ядра кислорода оказывается меньше исходной энергии альфа-частицы. Существуют другие случаи, когда, наоборот, в результате ядерных столкновений происходит выделение энергии. Не следует думать, однако, что подобные процессы можно использовать в качестве источника даровой энергии. Это невозможно потому, что одно эффективное ядерное превращение приходится на огромное число столкновений, в которых исходные частицы «бессмысленно» растрачивают свою энергию в процессах ионизации.

Энергия, непрерывно выделяющаяся в процессах радиоактивного распада, также черпается из ядерных ресурсов — здесь массы ядер, получающиеся после распада, меньше массы исходного ядра. Но этот процесс остается вне нашего контроля, а медленно излучаемый из радиоактивного препарата поток энергии слишком слаб для практического использования.

Если быстрые альфа-частицы способны вызывать ядерные превращения, то нельзя ли вызвать ядерные реакции, используя в качестве ядерных снарядов другие частицы, скажем,— протоны? Такие процессы действительно существуют, и первая успешная ядерная реакция под действием ускоренных протонов была получена в 1932 г. В этом случае в качестве мишени использовался литий, так что соответствующее «химическое» уравнение может быть написано следующим образом:

$$ {}_3\mathrm{Li}^7 + {}_1\mathrm{H}^1 \rightarrow {}_2\mathrm{He}^4 + {}_2\mathrm{He}^4. $$

Рассматриваемая реакция идет с выделением огромного количества энергии. Но получение энергии таким способом по-прежнему невыгодно, так как снова одно превращение приходится на много тысяч быстрых протонов, которые надо предварительно ускорить.

Таким образом, была доказана осуществимость древней мечты алхимиков о возможности превращения одного элемента в другой, но стоимость золота, которое могло быть получено таким путем, оказалась бы несравненно больше стоимости обычного золота. Открытие Резерфорда указало также на возможность искусственного получения энергии из ядерных запасов, хотя и не дало еще в руки человечества возможности использования ядерной энергии.

Ядерная частица, лишенная заряда

В том же 1932 году, когда впервые была осуществлена ядерная реакция с литием, бомбардируемым ускоренными протонами, в физике произошло еще одно исключительное по важности событие. К числу уже известных элементарных частиц, входящих в состав атома,— к протону и электрону — прибавилась еще одна частица — нейтрон. Этой частице суждено было сыграть в дальнейшем первостепенную роль, ее открытие привело к неисчислимым последствиям. Вкратце история этого открытия такова. При бомбардировке альфа-частицами легкого элемента бериллия с массой 9 возникает какое-то плохо поглощающееся веществом излучение. Если это излучение попадает на парафин или другое соединение, богатое водородом, то парафин начинает выбрасывать протоны с очень большой энергией. Вскоре было установлено, что новое излучение состоит из потока неизвестных раньше быстрых незаряженных частиц — нейтронов — с массой, приблизительно равной массе атома водорода.

Напишем схему превращения, в результате которого появляется нейтрон. Ядро бериллия с массой в девять единиц и зарядом в четыре единицы после столкновения с альфа-частицей превращается в ядро с массой 13 и зарядом 6. Из этого ядра немедленно вылетает нейтрон, в результате чего заряд не изменяется, а масса изменяется на единицу и становится равной 12. Иными словами, ядро бериллия в соединении с ядром гелия дает ядро углерода и нейтрон.

В наших обозначениях схема превращения запишется так:

$$_4Be^9 + {_2He^4} \rightarrow {_6C^{12}} + {_0n^1}.$$

Здесь буква n является символом нейтрона; верхний значок указывает на его массу, нижний — ноль — на отсутствие заряда.

Свойства вновь открытых частиц оказались весьма необычными. Будучи лишенными заряда, нейтроны очень слабо взаимодействуют с электронными оболочками атомов и не тратят энергию на ионизацию. Отсутствие заряда позволяет им легко приближаться к положительно заряженному ядру, проникать внутрь ядра и вступать с ним во взаимодействие. Поэтому, хотя число нейтронов, которое удавалось сначала получать в ядерных реакциях, было невелико, все возникающие нейтроны эффективно взаимодействовали с ядрами, и соответствующие реакции могли легко наблюдаться. И действительно, вскоре после открытия нейтрона было найдено множество новых ядерных реакций (рис. 3). Взаимодействие нейтронов с ядрами приводит как к образованию уже известных стабильных ядер, так в ряде случаев и к образованию новых, неизвестных в природных условиях, неустойчивых ядер. Такие ядра затем начинают распадаться, т. е. являются радиоактивными. Впервые искусственно-радиоактивное ядро (изотоп фосфора P^{30}) было создано в 1934 г., правда, не в результате нейтронного облучения, а под действием бомбардировки алюминия α-лучами. Вскоре большое число разнообразных радиоактивных ядер было получено и путем нейтронного облучения ряда элементов.

Честь открытия искусственной радиоактивности принадлежит Ф. Жолио-Кюри и Ирен Кюри (дочери Марии Кюри). Это событие сыграло большую роль в дальнейшем развитии ядерной физики.

Открытие нейтрона, казалось, должно было существенно улучшить перспективы получения ядерной энергии. Не в пример альфа-частице, нейтроны, проходя через вещество, не растрачивают свою энергию на ионизацию и, попадая в конечном счете в ядро, взаимодействуют с ним. Если происходящая в результате захвата нейтронов ядерная реакция сопровождается выделением энергии, то процесс поглощения нейтронов веществом энергетически выгоден. Но не следует забывать об оборотной стороне медали: для получения самих нейтронов необходимы

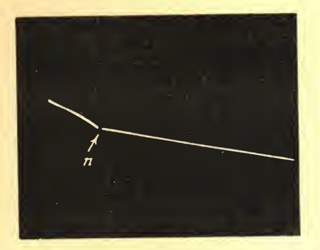


Рис. 3. Расщепление ядра азота нейтроном. Быстрый нейтрон (направление его полета показано стрелкой) вызывает в газе камеры Вильсона расщепление ядра азота. Длинный след принадлежит α-частице, короткий — ядру бора. След нейтрона, незаряженной частицы, невидим, так как нейтрон не производит ионизации.

Реакция: ${}_0n^1 + {}_7N^{14} = {}_2He^4 + {}_5B^{11}$

быстрые заряженные частицы, приходится израсходовать сотни тысяч или даже миллионы альфа-частиц, чтобы получить один нейтрон.

Открытие нейтронов не только привело к целому потоку работ, в которых изучались новые реакции ядер с нейтронами, но заставило подвергнуть пересмотру прежние взгляды на строение ядра. Действительно, оставался в тени очень важный вопрос: если нейтроны возникают при ядерных реакциях, — а само открытие нейтрона ясно указывает на это,— то они должны быть важной составной частью ядра. Если признать, что нейтрон является одной из составных частей атомного ядра, то сразу разрешается одно серьезное затруднение, о котором для ясности изложения мы пока ничего не говорили. Дело в том, что квантовая механика, применение законов которой позволило объяснить поведение электронов в оболочке атома и объяснить со многими деталями бесчисленные особенности в оптических, электрических, магнитных и

химических свойствах атомных систем, приводила к неразрешимым противоречиям при попытках установить хотя бы в самых общих чертах поведение электронов внутри ядра. Получалась курьезная ситуация. С одной стороны, электроны должны быть внутри ядра, чтобы скомпенсировать излишний положительный заряд протонов. С другой стороны, их присутствие там приводило к противоречию с законами квантовой механики и, кстати сказать, с обнаруженными на опыте магнитными свойствами ядер.

Открытие нейтрона ликвидирует эту трудность. Нет нужды теперь допускать существование электронов внутри ядра. Ядро следует представлять себе состоящим из протонов — в числе, равном порядковому номеру,— и нейтронов — в числе, дополняющем вес ядра до требуемой величины. Например, ядро лития 7 с порядковым номером 3 состоит из трех протонов и четырех нейтронов, ядро серебра 107 состоит из 47 протонов и 60 нейтронов и т. д.

Для ясного понимания рассматриваемых явлений следует указать, что новая схема строения ядра ни в какой мере не изменяет сделанных раньше выводов относительно существования дефектов масс ядер. Если воспользоваться примером атома гелия и сложить массу двух протонов и двух нейтронов, входящих в ядро, с массой двух планетарных электронов, то результирующий вес будет по-прежнему заметно превышать вес отдельного атома гелия. Атом гелия весит меньше, чем составляющие его части. Подобные же результаты получаются при анализе весов и других ядер. Особенно плотно «упакованы» ядра элементов в середине периодической системы. К концу периодической системы связь частиц в ядре начинает убывать. Поэтому распад ядра радия сопровождается выделением энергии: протоны и нейтроны в продукте его распада — радоне — упакованы более плотно, чем в самом радии, и разность энергии связи проявляется в виде энергии вылетающей альфа-частицы.

Но все-таки приведенная схема строения ядра кажется сомнительной: ведь в процессе радиоактивного распада часто наблюдаются случаи, когда из ядра вылетает электрон (бета-частица). Откуда же берется этот электрон, если его нет в ядре? Электронов в ядре действительно нет, но при бета-распаде они рождаются за счет превращения одного нейтрона внутри ядра в протон. Электроны

возникают в ядре и вылетают из него, а не лежат в сложенном виде внутри ядра, подобно тому, как звуки Лунной сонаты Бетховена не спрятаны под деревянной крышкой рояля, а рождаются при ударах о клавиши.

Развитие науки дает бесчисленные примеры того, как решение одного вопроса немедленно приводит к постановке следующего.

Какими силами удерживаются вместе нейтроны и протоны, образующие атомное ядро? До сих пор физикам были известны только силы двух родов — силы тяготения и электромагнитные силы, но и те, и другие не подходят для нашего рассмотрения. Силы тяготения слишком слабы и были бы совершенно недостаточны для создания таких исключительно прочных образований, как атомные ядра. Об электрических силах между нейтральными частицами — нейтронами — говорить вообще не приходится. Надо ввести в рассмотрение новые силы — ядерные силы, отличающиеся рядом необычных особенностей. Прежде всего эти силы заметно проявляются только на самых маленьких расстояниях. Лишь когда два протона, протон и нейтрон или два нейтрона сближаются на расстояния, в сотни тысяч раз меньшие поперечника атома, т. е. на расстояния, примерно совпадающие с размерами самих элементарных частиц, между ними начинают действовать мощные притягательные силы. Замечательно, что величина этих сил практически не зависит от того, заряжены взаимодействующие частицы или нет. Если летящие навстречу два протона обладают такой энергией, что смогут преодолеть нарастающее электрическое отталкивание, то на какой-то стадии отталкивание сменится сильным притяжением. Величина силы притяжения, возникающая между двумя нейтронами, столь же значительна.

Итак, открытие нейтронов не только привело к новой модели атомного ядра, но и впервые поставило исключительный по своему значению вопрос о ядерных силах.

1932 год был богат событиями в области физики. В этом году была открыта еще одна элементарная частица. Речь идет о позитроне — своеобразном двойнике электрона.

Уже давно физики занимались изучением природы одного загадочного явления — космических лучей — излучения, которое падает на Землю из недр мирового пространства и вызывает постоянную, но очень слабую

ионизацию атмосферы. Это излучение обладает большой проникающей способностью, т. е. очень слабо поглощается веществом. Чтобы установить, каков состав космического излучения, чтобы узнать, состоит ли оно из потока заряженных частиц или жестких электромагнитных колебаний, уже в конце двадцатых годов были сделаны первые попытки применить камеру Вильсона, удаленную от каких-либо радиоактивных источников. С такой «пустой» камерой Вильсона было сделано множество фотографий в надежде, что среди них найдутся и такие, на которых будут обнаружены следы частиц космического происхождения. На некоторых фотографиях удалось заметить следы частиц, которые почти совсем не были искривлены, несмотря на то, что камера находилась между полюсами довольно сильного электромагнита. По-видимому, частицы, породившие эти следы, обладали столь большой энергией, двигались настолько быстро, что магнитные силы не могли заметно изменить их первоначальный путь.

Действительно, когда были применены еще более сильные магниты, что произошло в 1932 г., искривление следов, порожденных космическими частицами, было замечено. Многие из этих следов принадлежали электронам, о чем можно было судить по плотности капелек тумана в следе частиц, другие принадлежали массивным заряженным частицам. Но странно то, что некоторые из электронных следов были повернуты в одну сторону, другие — в противоположную. Почему это могло быть? Проще всего предположить, что эти следы принадлежат электронам, летящим в противоположные стороны. Но это предположение ошибочно. Рассмотрим рис. 4. Здесь виден след частицы, проходящей через всю камеру и пронизывающей металлический экран, расположенный посредине. Проходя через экран, частица замедляется и должна, конечно, сильнее заворачивать в магнитном поле — ее след должен быть сильнее изогнут. Действительно, внизу след частицы более искривлен, чем наверху. Следовательно, частица летит сверху вниз. Тогда, зная, где северный и где южный полюс магнита, и зная, в какую сторону летит электрон, можно было сказать, куда он должен отклониться. Электрон должен был отклониться направо. Но на фотографии мы видим след, изогнутый налево! Единственный выход состоит в признании того, что суще-

ствует положительно заряженная частица, не являющаяся протоном (протон создал бы несравненно более плотный след). Иными словами, наблюдаемый след принадлежит частице с массой электрона, но обладающей положительным зарядом. Так был открыт позитрон.

Почему же это открытие не было сделано раньше? Почему во всех опытах, где мы сталкиваемся с движущимися электронами, и в радиолампах и в медных проводниках, при изучении процессов электролиза и газового разряда мы имеем дело только с отрицательными элект-

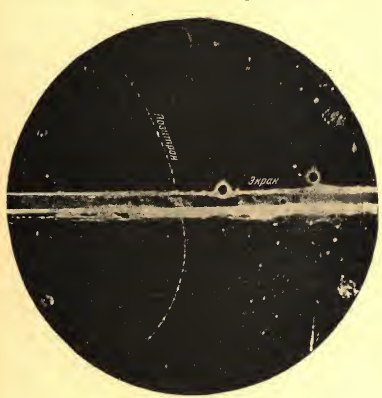


Рис. 4. Открытие позитрона. Позитрон влетает в камеру Вильсона, помещенную в магнитном поле. Позитрон тормозится в экране, пересекающем камеру, и его след внизу искривлен сильнее. Направление искривления в магнитном поле отвечает положительному заряду



Рис. 5. Рождение электронно-позитронной пары. Гамма-квант, влетающий в камеру Вильсона, превращается в металлическом экране, перегораживающем камеру, в электронно-позитронную пару. Камера находится в магнитном поле. Видно, что заряды родившихся частиц противоположного знака. Большое количество следов объясняется вырыванием электронов из атомов газа потоком квантов

ронами? Потому, что позитрон появляется при сравнительно редких процессах и вскоре затем исчезает, но исчезает он, разумеется, не бесследно. Когда позитрон исчезает, сталкиваясь с электроном, то одновременно рождаются две частицы света, правда, не обычного, видимого света, а частицы гамма-лучей.

Можно наблюдать и противоположный процесс — рождение пары: электрона и позитрона. Это происходит при поглощении гамма-лучей вблизи ядра (рис. 5).

Открытие позитронов и их свойств явилось новым блестящим подтверждением всеобщего характера закона сохранения и превращения энергии и массы. При возникновении электронно-позитронной пары энергия гамма-кванта и связанная с ней масса превращаются в массу

двух возникающих частиц. А избыток энергии (если он есть) проявляется в энергии движения разлетающихся частиц. При исчезновении двух заряженных частиц энергия, связанная с их массой, превращается в энергию двух гамма-квантов. Законы сохранения были проверены на этих процессах, и, как оказалось, они соблюдаются с безукоризненной точностью.

Освобождение ядерной энергии

Открытие нейтронов предоставило физикам широкие возможности для выполнения самых увлекательных опытов по искусственному превращению атомов, по осуществлению все новых и новых ядерных реакций. Часть этих реакций давала уже знакомые ядра, другие реакции приводили к образованию неустойчивых ядер и к появлению искусственных радиоактивных элементов. Эта ядерная химия была одним из главных направлений развития физики тех лет. Другое направление было связано с изучением ядерных сил и с построением огромных машин — циклотронов и других ускорителей, при помощи которых можно получать достаточно быстрые и достаточно интенсивные потоки заряженных частиц, пригодных для зондирования ядер и выявления свойств самих элементарных частиц. Этот вопрос мы обсудим позднее, а пока вернемся к первому направлению, которое, хотя и не непосредственно, привело к последнему из плеяды великих открытий ядерной физики тридцатых годов.

В 1934 г. итальянский физик Ферми заинтересовался вопросом, что произойдет, если облучать нейтронным потоком самый тяжелый из элементов периодической системы — уран. Если после захвата нейтронов получится искусственное радиоактивное ядро, которое испустит электрон, то заряд ядра увеличится на единицу, и мы получим элемент с порядковым номером 93, не существующий в природе. Его ядро должно быть также радиоактивным (иначе мы давно нашли бы такие атомы на Земле) и, вероятно, способно давать длинную цепь дальнейших превращений.

Руководствуясь этими соображениями, Ферми проделал соответствующие опыты и действительно установил, что после облучения нейтронами урана получаются четыре различных радиоактивных вещества. Уран обла-

дает тремя изотопами. Поэтому наличие четырех радиоактивных веществ (позднее были найдены еще 9) сразу указывает на необычность и сложность явления. Да, явление оказалось настолько сложным, что понадобилось пять лет работы лучших специалистов, чтобы распутать эту проблему. Начать с того, что некоторые из радиоактивных продуктов не удалось отождествить ни с одним из известных элементов от ртути до урана. Предположение о том, что получающиеся вещества принадлежат к заурановым элементам, — то предположение, которое послужило исходным моментом во всей серии начатых опытов, — также приводило к сложным противоречиям.

Разгадка пришла с установлением того факта, что при облучении урана нейтронами получается изотоп бария — элемента, лежащего в середине периодической системы и удаленного на 36 клеток от урана.

До сих пор, во всех случаях искусственной и естественной радиоактивности, процесс распада сводился к перемещению распадающегося ядра в соседние клетки периодической системы — ядро смещалось на две клетки назад при альфа-распаде, на одну клетку вперед при бета-распаде. В данном случае мы имеем дело с каким-то совершенно другим процессом, при котором ядро урана разваливается на части, происходит так называемый процесс деления ядра. Ядра, образующиеся при делении урана, принадлежат элементам, лежащим в середине периодической системы. Так, например, сравнительно часто ядро урана разваливается на ядра бария и криптона, реже — на ядра серебра и родия (рис. 6).

Открытие деления ядра вызвало огромный интерес. За один 1939 год было осуществлено около ста научных работ, посвященных изучению этого явления.

Каковы же были те замечательные черты нового явления, которые вызвали такой исключительный интерес? Прежде всего эта ядерная реакция сопровождается чрезвычайно большим выделением энергии. Если сравнить массу исходного ядра урана с полной массой образующихся частиц, то оказывается, что на каждый акт деления приходится энергия в 200 миллионов электронвольт [2]. Иными словами, в результате деления всех ядер, содержа-

[2] Один электронвольт есть энергия, которую приобретает частица, обладающая электрическим зарядом, равным заряду электрона, и прошедшая ускоряющее напряжение в 1 вольт.



Рис. 6. След осколка ядра урана в камере Вильсона. Большой заряд осколка приводит к интенсивной ионизации молекул газа, наполняющих камеру. Поэтому траектория осколка представляется в виде широкого следа, резко отличающегося от более тонких следов α-частиц

щихся в 100 *г* урана, получается энергия, равная выработке мощной гидроэлектростанции за 1 час. Но это, пожалуй, не самое замечательное. И раньше были известны ядерные реакции, которые сопровождались большим энергетическим выходом (напомним хотя бы реакцию лития с протоном). Самое интересное, что деление одного атома урана сопровождается одновременным образованием двух-трех нейтронов.

Это обстоятельство открывает совершенно новые возможности. Если в любой изученной раньше ядерной реакции выделение энергии покупалось ценой предварительного ускорения протона или альфа-частицы и сопровождалось бесполезной растратой энергии на ионизационные потери, то в данном случае, по крайней мере в принципе, эти трудности отпадают. Реакция деления, начавшись, может развиваться дальше в виде цепной реакции за счет поглощения в толще урана вновь образующихся нейтронов. Перспективы возможного осуществления ядерной реакции в больших масштабах стали ясны физикам, и последующие технические разработки привели, как известно, к использованию ядерной энергии.

Так развитие одного из частных вопросов ядерной физики — исследование одной из многих ядерных реакций — привело в конечном счете к открытию, повлекшему гигантские последствия для всего человечества.

Открытие деления ядер возникло из попытки синтезировать заурановые элементы. В настоящее время по крайней мере девять таких элементов получено искусственно, и таблица Менделеева продолжена до 101-го элемента. Нет сомнений в том, что ближайшие годы принесут дальнейшие успехи в синтезе новых тяжелых элементов[3].

Новые элементарные частицы

Мы уже говорили, что прочная связь тяжелых частиц — протонов и нейтронов — внутри ядра указывает на существование ядерных сил, обладающих на малых расстояниях необычайной интенсивностью. Для дальнейшего развития науки необходимо было не только изучить внешние проявления этих сил, но и выяснить их природу. Физики-теоретики вскоре пришли к заключению, что силы притяжения между тяжелыми частицами должны быть связаны с существованием неизвестных раньше в природе нестабильных частиц (названных позднее «мезонами»), обладающих массой, промежуточной между массой протона и электрона и равной приблизительно 200—300 электронных масс. Когда две тяжелые частицы на малых расстояниях притягиваются одна к другой, одна из них должна испускать, а другая поглощать эту гипотетическую нестабильную частицу. Мезоны должны играть роль своеобразного «ядерного клея», который удерживает тяжелые частицы внутри ядра и приводит к огромным энергиям связи. Экспериментальные подтверждения этих смелых предсказаний теоретиков были найдены при изучении космических лучей, в результате длительных и трудных исследований.

Прежде всего, в 1937 г. в результате опытов, выполненных с камерой Вильсона, было доказано наличие в потоке космических лучей заряженных частиц с массой, равной примерно 200 электронных масс (рис. 7). Существуют как положительно, так и отрицательно заряженные частицы; они неустойчивы и за одну миллионную

[3] В настоящее время синтезированы изотопы 102-го и 103-го элементов.— *Прим. ред.*



Рис. 7. Фотография следа μ-мезона. В камере Вильсона виден след μ-мезона, пришедшего сверху. μ-мезон, потеряв энергию на ионизацию, останавливается в камере и распадается, испуская быстрый электрон

долю секунды распадаются. Казалось, что найдены частицы, которые были придуманы теоретиками для объяснения ядерных сил. Однако дальнейшие исследования показали, что это заключение ошибочно. Найденная частица (она называется теперь «мю-мезон») слишком слабо взаимодействует с ядрами и не может претендовать на роль «ядерного клея». Прошло 10 лет прежде чем были открыты те мезоны, которые обеспечивают ядерное взаимодействие. Дальнейшее изучение свойств мезонов нераз-

рывно связано с разработкой еще одного замечательного способа регистрации ядерных частиц — метода фотоэмульсии, который в известной мере аналогичен методу камеры Вильсона. Заряженная частица, пронизывая специально приготовленную фотоэмульсию, ионизует зерна бромистого серебра и делает их способными к проявлению. В результате вдоль пути пролетевшей частицы после проявления эмульсии возникает цепочка черных зерен металлического серебра, которые запечатлели судьбу прошедшей частицы. Эмульсия в 2 тысячи раз плотнее воздуха, и если, скажем, альфа-частица в воздухе имеет пробег в несколько сантиметров, то в эмульсии она пройдет путь всего лишь в несколько десятков микрон. Если к тому же учесть, что диаметр цепочки зерен серебра измеряется десятыми долями микрона, то ясно, что для рассмотрения возникающих следов частиц нужен микроскоп с очень большим увеличением (в несколько тысяч раз).

Как и в камере Вильсона, частицы с различными зарядом, массой и энергией оставляют следы различной формы, создают цепочки проявленных зерен серебра различной густоты. Это позволяет, рассматривая полученную фотографию, различать следы разных частиц. Толщина эмульсионных слоев на стекле достигает 1 *мм*, а в недавно разработанных эмульсионных камерах — даже нескольких сантиметров. Для наблюдения очень быстрых частиц, что особенно важно при изучении космических лучей и мезонов, такие эмульсионные слои оказываются несравненно удобнее, чем камеры Вильсона. В самом деле, протон, ускоренный разностью потенциалов в 100 миллионов вольт, пройдет в эмульсии до полной остановки путь в 3 *см*. Для наблюдения этого процесса в камере Вильсона пришлось бы построить огромное сооружение диаметром около 100 *м*. Вторым крупным преимуществом фотометода, особенно существенным при изучении редких событий, является возможность длительного облучения эмульсии (на протяжении целого месяца) и непрерывного накапливания в ней фотографий ядерных процессов.

На рис. 8 в качестве примера использования фотометода изображено расщепление ядра серебра (или брома), входящего в состав эмульсии, быстрой космической частицей с вылетом заряженных частиц.

При изучении эмульсий, экспонированных космическими лучами на значительной высоте над поверхностью

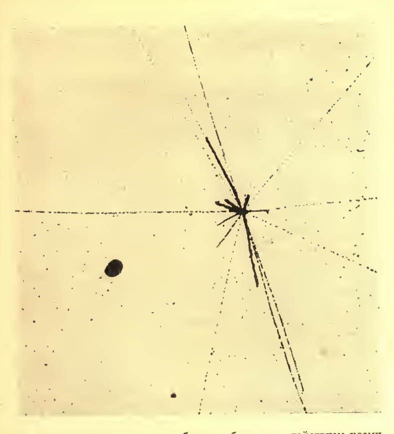


Рис. 8. Расщепление ядра серебра или брома под действием космической частицы. Нейтральная частица (возможно, нейтрон) расщепила тяжелое ядро фотографической эмульсии на 19 заряженных частиц. Некоторые из них — быстрые протоны (тонкие следы), другие — многозарядные ядерные осколки (жирные следы)

Земли, были обнаружены следы частиц, которые, останавливаясь в эмульсии, испускают быстрые легкие частицы (рис. 9). Дальнейшее изучение массы этих частиц по почернению следа показало, что остановившаяся частица имеет массу около 300 электронных масс, а частица, испущенная в месте остановки, является мю-мезоном с массой около 200 электронных масс. Таким образом, в этих опытах был открыт новый, более тяжелый сорт мезонов,

названных пи-мезонами. Заряд вновь открытых частиц равен заряду электрона и, подобно обычным электронам и мю-мезонам, может быть как положительным, так и отрицательным. Судьба распадающихся на лету пи-мезонов обоих знаков одинакова — они порождают мю-мезон того же знака. Иное происходит при торможении частиц. Затормозившийся отрицательный пи-мезон захватывается ядром и вызывает его расщепление с образованием так называемой «звезды» — одновременного вылета многих заряженных частиц (рис. 10). При этом выделяется энергия, соответствующая массе пи-мезона. Положительный пи-мезон, останавливаясь в веществе, не захватывается ядрами, так как он отталкивается от них электрическими силами и живет до тех пор, пока не распадается обычным способом, испуская мю-мезон.

Из тех же опытов вытекало, что время жизни пи-мезонов очень мало. Следовательно, эти частицы не могут прийти к нам из мирового пространства, а должны родиться где-то вблизи от места наблюдения. Спустя два года после открытия пи-мезонов в космических лучах, когда вошли в строй ускорители, позволяющие получать частицы с энергией в сотни миллионов электронвольт, было обнаружено рождение положительных и отрицательных пи-мезонов при соударениях протонов с протонами и протонов с нейтронами.

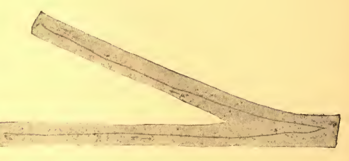


Рис. 9. Открытие π-мезона; $\pi - \mu$-распад. Положительный π-мезон, останавливаясь в эмульсии, распадается на μ-мезон и нейтрино. При этом μ-мезон обладает строго определенной энергией. Эта энергия позволяет ему пройти в эмульсии 600 микронов до полной остановки. Остановившись, он испытывает электронный распад

Раньше это явление не могло быть изучено в лабораторных условиях. Действительно, для рождения пи-мезонов необходима энергия, масса которой должна превышать массу возникающей частицы. Для этого сталкивающиеся частицы должны быть ускорены по меньшей мере до 300 миллионов вольт. Применение ускорителей позволило получать мезоны в значительно большем количестве, чем в опытах с космическими лучами. В результате удалось точно измерить массу мезонов обоих знаков и их время жизни, которое оказалось равным примерно одной стомиллионной доле секунды.

Вскоре работа на ускорителях привела к новому важному открытию. Были обнаружены нейтральные партнеры заряженных пи-мезонов. Масса новой частицы близка

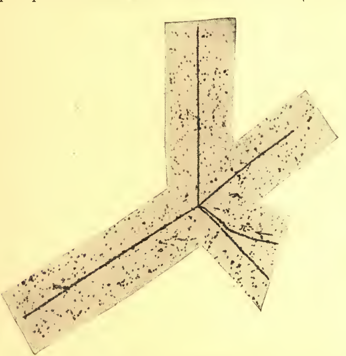


Рис. 10. Захват отрицательного π-мезона ядром. Отрицательный π-мезон после остановки захватывается ядром эмульсии, расщепляя его на четыре заряженные частицы. При захвате π-мезона выделяется 140 млн. электронвольт энергии, что соответствует массе π-мезона

к массе заряженной частицы, она также неустойчива и распадается на два гамма-кванта. Время жизни нейтрального пи-мезона еще в миллион раз меньше, чем время жизни заряженных частиц. Измерение таких ничтожных промежутков времени поистине является одним из триумфов современной экспериментальной физики.

Пи-мезоны рождаются при столкновении частиц и сами интенсивно взаимодействуют с ядрами. Поэтому именно пи-мезоны являются теми долгожданными частицами, посредством обмена которых осуществляется ядерное взаимодействие.

Если энергия тяжелой частицы (протона, нейтрона или быстрого ядра) очень велика, то при ядерных соударениях может произойти одновременное рождение не одного, а нескольких мезонов. Это явление получило название взрывных ливней. Рис. 11 дает представление об общем характере этого процесса. Энергия первичной частицы распределяется при этом среди многих рожденных мезонов.

Поток открытий новых частиц продолжается все последние годы. С 1947 г. (дата открытия пи-мезона) по 1954 г. было открыто еще по крайней мере шесть новых частиц — тяжелых мезонов, заряженных и нейтральных. Некоторые из этих частиц обладают массами около тысячи электронных масс, а две из них тяжелее протона. Все они нестабильны и имеют время жизни около одной миллиардной доли секунды. В качестве примера на рис. 12 приведена фотография следа, оставленного в эмульсии тяжелым мезоном с массой около тысячи электронных масс. Это так называемый тау-мезон, который после своей остановки распадается на три пи-мезона. На рис. 13 показан след продукта распада нейтральной частицы с массой, превышающей массу протона. Фотография этого процесса получена в камере Вильсона. В данном случае частица (так называемая ламбда-ноль частица) распадается на протон и отрицательный пи-мезон.

Важно отметить, что открытие всех тяжелых мезонов, а также взрывных ливней было сделано в космических лучах. Это было связано с тем, что ускорители того времени не могли сообщить частицам энергию, достаточную для осуществления данных процессов. Лишь в самое последнее время тяжелые мезоны были получены на гигантском ускорителе — космотроне, сообщающем прото-

5*



Рис. 11. Множественное рождение π-мезонов. Легкое ядро очень большой энергии, входящее в состав первичной компоненты космического излучения, вызывает множественное рождение π-мезонов при соударении с ядром эмульсии

нам энергии до 2,3 миллиарда электронвольт. Детальное изучение свойств новых частиц может быть выполнено в полной мере лишь при наличии установок подобного рода.

* * *

За истекшую половину века был открыт новый, неведомый раньше мир — мир атомных явлений. Проникнув в глубины атома, мы убедились, что элементарные частицы, из которых построены атомные системы, подчиняются непривычным и странным на первый взгляд законам — законам квантовой теории и теории относительности. Изучение взаимодействия элементарных частиц и свойств атомных ядер привело к открытию новых сил, ядерных, несравненно более могущественных (на малых расстояниях), чем давно известные электрические силы и силы тяготения. Сами элементарные частицы обнаружили поразительную способность к взаимным превращениям. Электроны и позитроны, мезоны всех сортов и кванты света переходят друг в друга.

Можно утверждать, что физика наших дней дает блестящее подтверждение слов, сказанных великим Ньютоном свыше 250 лет назад: «Природа любит превращения, она как бы услаждается ими. Почему бы ей не превращать свет в тела и тела в свет».

Истинное познание ядерных сил, однако, еще не достигнуто. Внутренняя связь взаимно превращающихся частиц не понята. Систематика элементарных частиц отсутствует; задачи, поставленные предыдущими исследованиями, ждут своего решения.

Новое, более глубокое понимание природы элементарных частиц и строения ядра будет достигнуто в будущем, которое принесет с собой и новую теорию ядерных явлений, еще более величественную и грандиозную, чем квантовая теория и теория относительности, при помощи которых мы познаем в настоящее время мир атомных явлений.

* * *

Настоящий очерк был написан в 1955 г. Семь лет составляют заметный срок и в жизни отдельного человека, но для науки наших дней, темпы развития которой так стремительны, — это целая эпоха[4]. Не удивительно, что некоторые места в статье являются сейчас анахронизмом.

[4] Дополнение сделано автором в конце 1962 г. — *Прим. ред.*

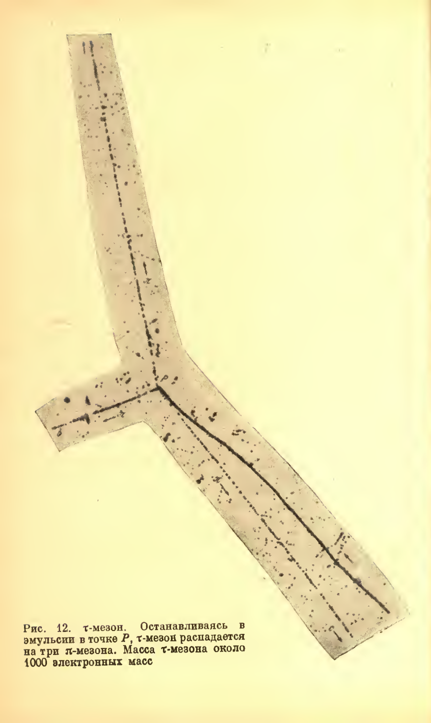


Рис. 12. τ-мезон. Останавливаясь в эмульсии в точке P, τ-мезон распадается на три π-мезона. Масса τ-мезона около 1000 электронных масс

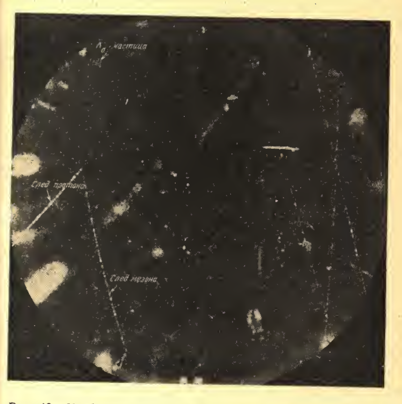


Рис. 13. Ламбда-ноль частица. Нейтральная частица с массой около 2200 электронных масс (след ее невидим) испытывает распад в камере Вильсона на протон и отрицательный π-мезон

За прошедшие годы изменилось многое. Роль атомной и ядерной физики в жизни современного общества стала еще значительнее. Не единственная атомная электростанция, а десяток промышленных установок вырабатывает электроэнергию и в Советском Союзе, и в Англии, и в Соединенных Штатах. Особенно упорно в этом направлении работают инженеры и физики Англии, так как энергетические ресурсы ее (уголь, гидроэнергия, нефть) несравненно скромнее запасов Советского Союза или США.

На протяжении последних лет появилась проблема управляемого термоядерного синтеза. Одна из труд-

нейших научно-технических задач, когда-либо возникавших перед людьми, она сулит, в случае успешного решения, энергетическое изобилие на вечные времена для всего человечества. Поэтому понятен тот размах, который приняли исследования в этой области во всех крупнейших странах мира, прежде всего в СССР.

В самой ядерной физике происшедшие изменения означали не только появление новых технических средств и методов исследования, не только существенное обогащение коллекции элементарных частиц, но и возникновение фундаментальных и совершенно новых идей. Разумеется, мы не можем здесь дать систематический обзор происшедших событий — это потребовало бы отдельной большой статьи; поэтому мы ограничимся кратким перечислением главных вех на пути развития ядерной физики последних лет и приведем современную таблицу элементарных частиц.

Самый большой ускоритель заряженных частиц, существовавший восемь лет назад, мог сообщить протонам энергию, не превышавшую 2,3 миллиарда электронвольт. За этим ускорителем последовало сооружение машин на 6, 10, 28 и 30 миллиардов электронвольт. Построение двух последних машин оказалось возможным благодаря изобретению нового метода стабилизации траекторий частиц в ускорителе — метода жесткой фокусировки. Создание гигантских ускорителей продиктовано стремлением к открытию новых частиц, к дальнейшему изучению их свойств и взаимных превращений, словом, ко все более глубокому проникновению в удивительный мир микроявлений.

Имеющиеся ускорители уже позволили решить одну из задач, поставленных предыдущим развитием ядерной физики, — осуществлен синтез антинуклонов. Антипротоны были открыты в самом конце 1955 г. при бомбардировке медной мишени пучком протонов; антинейтроны открыты годом позднее. Само понятие «частицы» и «античастицы» было уточнено. Мы говорили, что данная «двойка» элементарных частиц составляет частицу и античастицу, если они способны к парному рождению при затрате соответствующей энергии (превышающей энергию покоя обеих частиц) и к парной аннигиляции с выделением энергии. Закон сохранения электрического заряда требует, чтобы античастица положительно заря-

женной частицы была заряжена отрицательно, и наоборот, античастица нейтральной частицы, разумеется, также нейтральна. В настоящее время почти для всех элементарных частиц открыты свои античастицы. Существуют истинно нейтральные частицы, не имеющие партнеров в антимире; к их числу принадлежат фотоны и нейтральные π-мезоны.

Помимо открытия антинуклонов и нескольких гиперонов (со своими античастицами), в ходе опытов с ускорителями и с космическими лучами были уточнены свойства самых легких частиц и свойства K-мезонов. Важнейшую роль в успешном развитии этих работ сыграло изобретение еще одного превосходного регистрирующего инструмента, так называемой пузырьковой камеры. В свое время применение фотоэмульсионного метода было продиктовано невозможностью регистрации ультрарелятивистских частиц в камерах обычных размеров. Это преимущество было получено сравнительно дорогой ценой — применение магнитного поля для анализа свойств частиц исключалось. В пузырьковой камере исследуемая частица движется в среде, состоящей из жидкого водорода. Мелкие пузырьки газа образуются на ионах, возникших вдоль следа частицы, и делают его видимым. В этом приборе удачно сочетается среда повышенной плотности с возможностью наблюдения следов, достаточно, но не чрезмерно длинных, в магнитном поле.

Использование новой измерительной техники и все растущий размах исследований привели к увеличению надежности и повышению точности в определении масс элементарных частиц и времени их жизни. Таблица элементарных частиц теперь значительно богаче, чем это было еще несколько лет назад.

Поиски и открытия новых элементарных частиц, постройка гигантских ускорителей, разработка новых оригинальных методик не должны заслонять фундаментальное открытие, сделанное американскими физиками Ли и Янгом осенью 1956 г. К сожалению, суть дела очень сложна, и нам придется ограничиться весьма приблизительным описанием. Сначала одно предварительное замечание. Теоретический анализ указывает на существование глубокой связи между общими свойствами пространства и времени и теми законами сохранения, которые играют исключительно важную роль в физике. Так, ут-

Таблица элементарных частиц

№ п/п	Группа	Название и обозначение частицы	Масса (масса электрона принята за 1)	Время жизни в вакууме	Схема распада (основная)	Название и обозначение античастицы
1		Фотон (квант света) γ	0	Стабилен	—	Совпадает с самой частицей γ
2	Лептоны	Электрон e^-	1	»	—	Позитрон e^+
3	Лептоны	Электронное нейтрино ν_e	0	»	—	Электронное антинейтрино $\tilde{\nu}_e$
4	Лептоны	Мюонное нейтрино ν_μ	0	»	—	Мюонное антинейтрино $\tilde{\nu}_\mu$
5	Лептоны	Положительный мю-мезон μ^+	206,8	$2{,}21\cdot10^{-6}$ сек.	$\mu^\pm \to e^\pm + \nu_e + \tilde{\nu}_e$	Отрицательный мю-мезон μ^-
6	Мезоны	Положительный пи-мезон π^+	273,2	$2{,}55\cdot10^{-8}$ сек.	$\pi^\pm \to \mu^\pm + \nu_\mu\ (\tilde{\nu}_\mu)$	Отрицательный пи-мезон π^-
7	Мезоны	Нейтральный » π^0	264,2	$2{,}3\cdot10^{-16}$ сек.	$\pi^0 \to 2\gamma$	Совпадает с частицей π^0
8	Мезоны	Положительный K-мезон K^+	966,6	$1{,}22\cdot10^{-8}$ сек.	$K^\pm \to \mu^\pm + \nu_\mu\ (\tilde{\nu}_\mu)$; $K^\pm \to \pi^\pm + \pi^0$	Отрицательный K-мезон $\tilde{K}^-$
9	Мезоны	Нейтральный » K^0	974,2	$\sim 10^{-10}$ сек.	$K^0 \to \pi^+ + \pi^-$; $K^0 \to 2\pi_0$	Нейтральный анти-K-мезон $\tilde{K}^0$
10	Нуклоны	Протон p	1836	Стабилен	—	Антипротон $\tilde{p}$
11	Нуклоны	Нейтрон n	1839	11,7 минут	$n \to p + e^- + \tilde{\nu}_e$	Антинейтрон $\tilde{n}$
12	Гипероны	Ламбда-гиперон Λ^0	2183	$2{,}5\cdot10^{-10}$ сек.	$\Lambda^0 \to p + \pi^-$	Анти-ламбда-гиперон $\tilde{\Lambda}^0$
13	Гипероны	Положительный сигма-гиперон Σ^+	2328	$0{,}8\cdot10^{-10}$ сек.	$\Sigma^+ \to p + \pi^0$; $\Sigma^+ \to n + \pi^+$	Отрицательный анти-сигма-гиперон $\tilde{\Sigma}^-$
14	Гипероны	Отрицательный сигма-гиперон Σ^-	2340	$1{,}6\cdot10^{-10}$ сек.	$\Sigma^- \to n + \pi^-$	Положительный анти-сигма-гиперон $\tilde{\Sigma}^+$
15	Гипероны	Нейтральный сигма-гиперон Σ^0	2332	$\sim 10^{-11}$ сек.	$\Sigma^0 \to \Lambda^0 + \gamma$	Нейтральный анти-сигма-гиперон $\tilde{\Sigma}^0$
16	Гипероны	Отрицательный кси-гиперон Ξ^-	2575	$1{,}3\cdot10^{-10}$ сек.	$\Xi^- \to \Lambda^0 + \pi^-$	Положительный анти-кси-гиперон $\tilde{\Xi}^+$
17	Гипероны	Нейтральный кси-гиперон Ξ^0	2560	$1{,}5\cdot10^{-10}$ сек.	$\Xi^0 \to \Lambda^0 + \pi^0$	Нейтральный анти-кси-гиперон $\tilde{\Xi}^0$

верждение о независимости законов природы относительно выбора начала отсчета времени эквивалентно закону сохранения энергии. Независимость (или, как принято говорить в физике, инвариантность) относительно выбора начала координат приводит к закону сохранения количества движения, а произвол в выборе направления координатных осей эквивалентен закону постоянства момента количества движения. Все три утверждения относительно свойств пространства—времени кажутся нам почти очевидными, само собой разумеющимися и не требующими дальнейших объяснений. Столь же просты и понятны и соответствующие им законы сохранения классической физики. С появлением квантовой механики был установлен еще один закон сохранения — так называемый закон сохранения четности, которому в пространственно-временном представлении отвечает симметрия между правым и левым винтом, между объектом и его зеркальным отражением. Казалось совершенно невероятным, чтобы природа оказывала предпочтение левшам или «правшам». Иными словами, никаких сомнений в симметричном устройстве мира, а следовательно, и в выполнении закона сохранения четности, не возникало. Замечательно, что во всех процессах, происходящих с участием огромных сил, связывающих нуклоны в ядрах, а также при всех электромагнитных взаимодействиях закон сохранения четности действительно остается незыблемым. Однако прямой эксперимент, выполненный в 1956 г., с явлением, в котором проявляются силы несравненно более слабые, чем ядерные или электромагнитные, эксперимент, в котором изучалось явление β-распада, подтвердил теоретическое предвидение Ли и Янга и опроверг универсальную применимость закона сохранения четности. Дальнейшие опыты показали, что вообще в любых процессах, относящихся к так называемым слабым взаимодействиям (в частности, к процессам, ответственным за β-распад), законы природы неинвариантны относительно зеркального отражения! Это утверждение подкреплено сейчас весьма широким кругом экспериментальных данных.

Через несколько месяцев после работ Ли и Янга советский физик лауреат Нобелевской премии Ландау высказал предположение, что закон сохранения четности должен быть заменен более общим положением, названным им законом сохранения комбинированной четности.

С помощью этого закона обнаруженные факты могут быть описаны в несколько менее парадоксальной форме. Согласно предположению Ландау, определенное направление винтовой симметрии связано с типом частиц: если, например, правый винт ассоциирован с частицами, то левый винт — с античастицами. Законы природы остаются неизменными при замене всех частиц античастицами и замене правого левым.

Вероятно, пора остановиться. Интересно, что будет открыто на протяжении следующих семи лет?

Атом и атомное ядро

Член-корреспондент Академии наук СССР
К. И. Щелкин*

В книге «Материализм и эмпириокритицизм» В. И. Ленин писал, что электрон так же неисчерпаем, как и атом, природа бесконечна. Эти слова, теперь известные каждому физику, оказались буквально пророческими.

В 1909 г., когда был опубликован гениальный труд В. И. Ленина, никто не подозревал о существовании атомного ядра. Через два года в Манчестерском университете великий английский физик Эрнест Резерфорд обнаружил, что α-частицы, испускаемые радием и обладающие зарядом, равным двум зарядам электрона, но противоположным ему по знаку, проходя через тонкую пластинку какого-нибудь вещества или сквозь слой газа, изредка отклоняются от своего пути на очень большой угол; они как бы наталкиваются на исключительно сильное электрическое поле, сосредоточенное в очень малом объеме с большой массой. Так было открыто атомное ядро. Подсчет числа отклонений дал возможность определить радиус ядра, оказавшийся примерно в сто тысяч раз меньше радиуса атома. Шарик сечением в копейку внутри сферы диаметром в километр — вот относительные размеры ядра водорода и его атома. Радиус ядра водорода — протона — равен $1{,}3 \cdot 10^{-13}$ *см*. Эта величина приблизительно во столько же раз меньше сантиметра, во сколько раз сантиметр меньше расстояния от Земли до Солнца. Практически вся масса атома заключена в его

* «Природа», 1961, № 10.

ядре. Если массу электрона принять за единицу, то масса протона составляет 1836 электронных масс (*эм*). Вещество в ядре обладает гигантской плотностью — в двести миллионов тонн в одном кубическом сантиметре. Можно привести такое сравнение: если бы было возможно сложить плотно друг к другу все ядра, содержащиеся в атомах, из которых состоит вода, наполняющая Черное море (его объем равен 537 000 *км*^{3}), то они разместились бы в кузове автомашины ГАЗ-51 (общий объем ядер равен примерно 2,5 *м*^{3}), но при одном условии: этот известный своими хорошими качествами грузовик должен выдержать тяжесть всего Черного моря.

Следующий после открытия ядра крупный шаг в науке о строении атома сделал датский физик Нильс Бор. Из данных о спектрах света, излучаемого и поглощаемого атомами, он вывел заключение, необычное для классической механики. Электроны, по его предположению, могут вращаться вокруг атомного ядра только по определенным орбитам. При переходе электрона с дальней орбиты на ближнюю излучается вполне определенная порция (квант) света. Возвратиться назад электрон в состоянии, лишь поглотив квант той же величины. Противоречие с классической механикой видно уже в том, что энергия, например кинетическая энергия вращающегося тела, может здесь принимать любое значение.

Гипотеза Бора позволила разобраться в строении атома водорода, многое объяснила в свойствах более сложных атомов и некоторых других физических систем. Однако предстояло еще найти физическое оправдание ей самой. Основные работы Бора были опубликованы в 1913—1915 гг., но только в 1925—1927 гг. Шредингер и Гейзенберг закончили построение основ квантовой механики, и Бор дал ей правильное физическое толкование.

Новая квантовая механика Гейзенберга и Шредингера (так ее называли в те годы, противопоставляя «старой» теории квант Бора) возводила в принцип двойственную (и волновую, и корпускулярную) природу физических тел. Гипотеза Бора оказалась одним из ее следствий. Располагая электроны в атомах на заданных орбитах в соответствии с законами квантовой механики, удалось описать не только оптические свойства атомов, но и их химические качества, объяснив тем самым периодический закон Д. И. Менделеева.

Неудача протонно-электронной модели ядра

Значительно медленнее продвигалось исследование структуры атомного ядра. Радиоактивный распад элементов, открытый в конце прошлого столетия, возможность искусственного превращения одних атомов в другие, доказанная в 1919 г. Резерфордом, — все это указывало на сложную структуру атомных ядер. Но определить их состав долго не удавалось.

В те годы было известно о существовании только двух элементарных частиц — протона и электрона. Из этих частиц и пытались построить модель ядра. Казалось, это был логичный путь. Протоны определяли в основном массу ядра, а разность чисел протонов и электронов — его заряд. Ядро He^4 (заряд его равен двум зарядам протона $Z = 2$, масса — четырем массам протона $A = 4$), с этой точки зрения, должно состоять из четырех протонов и двух электронов, нейтрализующих заряды двух протонов. Так можно построить модель каждого ядра. Но протонно-электронная модель ядра потерпела полный крах при приложении ее уже к самому простому после протона ядру — ядру тяжелого водорода — дейтрону ($Z = 1$, $A = 2$). Для понимания несостоятельности протонно-электронной структуры ядра надо обратиться к квантовой механике.

Согласно квантовой механике, многие из величин, свойственных частицам и их состояниям, не могут принимать произвольные значения, они изменяются лишь дискретными и притом вполне определенными порциями — квантами. Выше было рассказано, как свет, при переходе электрона в атоме с верхних (возбужденных) уровней на нижние, излучается квантами. Так называемые элементарные частицы, такие, как протон, электрон и некоторые другие, обладают, подобно волчку, вращающемуся вокруг своей оси, моментом количества движения (рис. 1). В классической механике момент количества движения равен произведению трех величин: массы, скорости вращения и расстояния от оси вращения до той точки, к которой можно отнести вращающуюся массу. Его размерность равна произведению массы на скорость и длину, или, что то же самое, произведению энергии на время. Согласно законам квантовой механики, величина спина не мо-

жет принимать произвольного значения. Спин измеряется в единицах кванта действия, введенного в физику в 1900 г. немецким ученым Максом Планком. Квант действия h, называемый также постоянной Планка, равен по величине $6{,}6 \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек*. Если h разделить на 2π и обозначить результат через $\hbar$ (эту величину тоже часто называют квантом действия), то спин частицы может принимать только значения, кратные половине $\hbar$, например спин электрона равен $1/2\ \hbar$. Обычно величину $\hbar$ опускают и говорят: спин электрона и спин протона равен 1/2, но при этом помнят, что он измеряется в единицах $\hbar$. Спины нескольких частиц, объединенных в каком-либо комплексе, например ядре, складываются необычным для классической механики способом: они могут быть или параллельны один другому или антипараллельны, т. е. тоже параллельны, но направлены в противоположные стороны.

Законы квантовой механики необычны для повседневной жизни, к ним долго не могли привыкнуть. Но они блестяще подтверждаются экспериментами с атомами, элементарными частицами и ядрами. Справедливость квантовой механики для микромира ныне уже не вызывает сомнений.



Рис. 1. Спин. Направлен в сторону перемещения винта с правой резьбой, если его поместить вдоль оси частицы и вращать по направлению ее вращения. Если бы пользовались левовинтовой системой отсчета, спин был бы направлен в противоположную сторону

Вернемся к протонно-электронной модели ядра. Спин протона равен 1/2, этой же величине равен спин электрона. В ядре дейтерия, согласно протонно-электронной модели, должно быть два протона и один электрон. Суммарный спин дейтрона может быть, если вспомнить закон сложения спинов, равен или 1/2, когда спины двух частиц

антипараллельны, или 3/2, если все они ориентированы в одну сторону. Но прямые измерения показали, что спин дейтрона равен единице. Следовательно, электронно-протонная модель дейтрона не удовлетворяет квантовой механике. Такое же положение возникает и с другими ядрами, когда число частиц, согласно этой модели, в ядре нечетно.

Нуклонное строение ядра

После открытия атомного ядра прошло более двадцати лет, пока Чедвик в 1932 г. не обнаружил еще одну элементарную частицу — нейтрон, давшую ключ к проблеме строения ядра. Очень скоро после открытия нейтрона, в том же 1932 г., советский ученый Д. Д. Иваненко и несколько позднее немецкий физик В. Гейзенберг предложили модель ядра, полностью удовлетворяющую экспериментальным фактам и квантовой теории. Согласно идее Д. Д. Иваненко, любое из ядер состоит из тяжелых частиц двух типов — протонов и нейтронов. Нейтрон — частица с массой в 1839 электронных масс, очень близкой к массе протона, не имеет электрического заряда, спин ее — 1/2. Дейтрон состоит из одного протона и одного нейтрона (рис. 2). Ядро He^4 содержит два протона и два нейтрона. В U^{238} содержится 92 протона и 146 нейтронов. В любом ядре Z протонов и A — Z нейтронов. В дейтроне спины протона и нейтрона направлены параллельно, и суммарный спин ядра, в согласии с опытом, равен 1. Частицы, составляющие ядра, — протоны и нейтроны — получили общее, объединяющее их название — нуклоны. Спин ядра, содержащего четное число нуклонов, целый, нечетное — полуцелый. Но как быть с электронами, излучаемыми ядрами при радиоактивном β-распаде? Было сделано смелое предположение, впоследствии подтвердившееся: они рождаются в процессе распада.

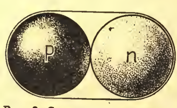


Рис. 2. Схематическое изображение ядра дейтрона

Об истории открытия нейтрона, имеющей драматический характер, стоит рассказать подробнее.

Проницательный Резерфорд еще в 1920 г. высказал предположение о возможности существования нейтральной частицы с массой, близкой к массе протона. Но физика в то время, вероятно, не была подготовлена к смелой идее Резерфорда, ее, как это часто бывает, забыли. Через 10 лет в Германии Боте и Беккер, исследуя действие α-частиц полония ($Z = 84$, $A = 210$) на различные вещества, обнаружили излучение, способное проникать через материалы, окружающие бомбардируемые мишени. Особенно сильным оно было, когда обстреливали бериллий. Авторам опыта не пришло в голову, что это был поток нейтральных частиц. Надо сказать, что и методика регистрации излучения не позволяла обнаружить нейтроны. Ирен и Фредерик Жолио-Кюри подробно исследовали проникающее излучение, открытое Боте и Беккером, но и эти великие экспериментаторы, известные крупными открытиями, приписывали излучение, как и его первооткрыватели, γ-частицам. Через месяц с небольшим после опубликования последней на эту тему работы Ирен и Фредерика Жолио-Кюри в английском журнале «Nature» («Природа»), вышедшем 27 февраля 1932 г., ученик Резерфорда, член Лондонского королевского общества Джеймс Чедвик опубликовал письмо в полстраницы с описанием измерения тех скоростей, которые излучение бериллия, облученного α-частицами, сообщает ядрам гелия, лития, бериллия и других элементов. Чедвик показал, что такие скорости могут быть приданы ядрам лишь нейтральной частицей с массой, близкой к массе протона. Так было доказано существование нейтрона, новой элементарной частицы, занимающей почетное место в ядерной физике и ее практических применениях. Нейтрон, находящийся вне ядра, радиоактивен, он имеет период полураспада примерно в 12 мин. и превращается в протон с испусканием электрона и нейтрино.

Внутриядерные силы

Выяснив состав атомного ядра, физики занялись вопросом, какие силы удерживают нуклоны внутри ядра. Полного ответа на этот вопрос не дано и поныне, несмотря на огромную работу, выполненную физиками-экспериментаторами и теоретиками. Естественно, ядерные силы нельзя измерять непосредственно, таких весов нет. О ха-

рактере и величине сил судят по отклонению (рассеянию) бомбардирующих частиц от своего первоначального пути при полете вблизи ядра. Например, для исследования сил между протонами водород обстреливают протонами. Силы между протонами и нейтронами изучают, направляя на водород пучок нейтронов. Труднее всего определять силы между нейтронами, потому что не удается сделать мишень из чистых нейтронов. Применяют мишень из дейтерия, ядро которого содержит один протон и один нейтрон, и судят о силах между нейтронами по разнице между взаимодействием нейтронов с дейтерием и водородом. Поэтому силы между нейтронами изучены хуже, чем между протонами или протоном и нейтроном, но большой разницы между ними не существует.

В ядерной физике связь между частицами принято характеризовать работой, которую надо затратить, чтобы развести частицы на такое расстояние, где они не взаимодействуют. В математических операциях их разводят на бесконечное расстояние. Эту работу называют энергией связи частиц. Поскольку нуклоны притягиваются друг к другу, то для их разведения надо затратить работу. И наоборот, нуклон, например нейтрон, попав извне внутрь ядра, сообщает частицам, находящимся в ядре, кинетическую энергию, равную его энергии связи. Энергия связи нейтрона в тяжелых ядрах равна приблизительно восьми миллионам электронвольт (8 *Мэв*). (Электронвольт, *эв*, — обычная для микромира единица энергии.) Цифру в 8 *Мэв* трудно представить наглядно. Для сравнения можно сказать, что нейтроны, общей массой в 1 *г*, попав внутрь атомных ядер, сообщают им энергию, по величине равную теплоте сгорания 20 *т* бензина.

Энергия взаимодействия между нуклонами уменьшается с увеличением расстояния между ними. Чем сильнее она зависит от расстояния, тем больше сила, связывающая частицы. Ядерные силы уменьшаются с отдалением нуклонов друг от друга очень быстро. На расстоянии в 3—4 *ферми* они практически обращаются в нуль. (*Ферми* — ядерная единица длины, названная так в честь великого итальянского физика, равна 10^{-13} *см*.) На расстоянии между нуклонами, существующими внутри ядра, — около 2,6 *ферми* между центрами нуклонов — ядерные силы в 10 раз сильнее электростатических и в баснословное число раз (10^{37}) сильнее гравитационных. Радиус

действия ядерных сил принято считать приблизительно равным 1,4 *ферми*. Такого порядка и радиус нуклона; обычно принимают его равным, как уже говорилось, 1,3 *ферми*. Ядерные силы не имеют аналогии среди сил, действующих между макроскопическими телами. Силы тяготения и электростатические, обратно пропорциональные квадрату расстояния между телами, отличаются от ядерных как по закону убывания с расстоянием, так и по абсолютному значению. Непохожи они на ядерные и по ряду иных свойств.

В 1934 г. советский физик, ныне академик и лауреат Нобелевской премии, И. Е. Тамм впервые развил теорию обменных ядерных сил. Эти силы, по природе квантово-механические, возникают при обмене двух взаимодействующих частиц третьей частицей, масса которой должна быть тем больше, чем выше их энергия связи. Обменные силы существуют и вне ядер, они, например, связывают в молекуле водорода два его совершенно одинаковых атома. Связь в этом случае осуществляется непрерывным обменом электронами. Расчеты И. Е. Тамма показали невозможность описания величины ядерных сил обменом известных в то время частиц малой массы — электронов и нейтрино. В частности, нейтрино — нейтральная частица с нулевой массой покоя, предсказанная швейцарским физиком Паули в 1931 г. по данным β-распада ядер, давала силы, в 10^{10} раз меньшие существующих в ядрах.

Мезоны

В 1935 г. двадцативосьмилетний преподаватель университета в г. Осака (Япония) Хидеки Юкава, развивая теорию обменных сил, предсказал существование новой частицы с массой около 200 электронных масс, названной мезоном, поскольку ее масса по величине находится между массами электрона и протона [1]. Для связи протона с нейтроном должен существовать электрически заряженный мезон, связь между двумя нейтронами или протонами может осуществляться только нейтральной частицей. Предсказание Юкавы блестяще и очень быстро

[1] По-гречески mezos означает промежуточный.— *Прим. ред.*

подтвердилось: через год в США Андерсон и Неддермайер обнаружили в составе космических лучей мезоны, получившие название μ-мезонов. Масса их равна 206 электронных масс, время жизни до распада на электроны и нейтрино — $2 \cdot 10^{-6}$ сек. Известны положительные и отрицательные μ-мезоны. В ускорителях теперь их получают в большом количестве. μ-мезоны хорошо исследованы, и самым удивительным и неожиданным их свойством оказалось то, что они, вопреки ожиданиям физиков, не имеют никакого отношения к ядерным силам. Облучая ядра μ-мезонами, выяснили исключительно слабую их склонность к взаимодействию с нуклонами. μ-мезоны оказались «лишними», роль их в природе пока неясна. Но в этом отношении, как это будет показано ниже, μ-мезоны далеко не одиноки.

Но все же обменный характер ядерных сил не вызывал сомнения, и предсказание Юкавы в конце концов подтвердилось. Через 11 лет после открытия μ-мезона, в 1947 г., тоже в космических лучах, были открыты более тяжелые мезоны — π-мезоны. Масса положительных и отрицательных π-мезонов равна 273 электронным массам, время жизни до распада на μ-мезоны и нейтрино составляет $2{,}5 \cdot 10^{-8}$ сек., спин равен нулю. Известны нейтральные π-мезоны с массой 264 *эм*, живущие меньше 10^{-15} сек. Распадаются они на два γ-кванта. π-мезоны сильно взаимодействуют с нуклонами, о чем свидетельствуют опыты по их рассеянию на нуклонах, и являются частицами, ответственными за обменные силы между нуклонами. Внутри ядра протон и нейтрон непрерывно, благодаря обмену π-мезонами, взаимно превращаются один в другой: протон в нейтрон, нейтрон в протон. Два нейтрона обмениваются нейтральными мезонами. π-мезон называют квантом поля ядерных обменных или мезонных сил, так же как фотоны — квантами электромагнитного поля.

Строение нуклона

Можно думать, что π-мезон в каком-то виде входит в состав нуклона. И действительно, прощупывание нуклона (протона или нейтрона) ускоренными электронами, опыты по рассеянию нуклонов на нуклонах указывают на сложную структуру нуклона. Нуклон имеет сердцевину, так называемый керн, радиусом приблизительно в

0,2 *ферми*. Керны двух нуклонов очень сильно отталкиваются. Природа сил отталкивания, не связанная с действием обменных мезонных сил, пока неясна и интенсивно изучается во многих лабораториях мира. Из 1839 электронных масс нейтрона большая часть сосредоточена в сердцевине ядра. Остальное вещество образует относительно рыхлую мезонную оболочку. Плотность мезонной оболочки неоднородна, к периферии она понижается. Заряд протона тоже распределен неоднородно. В районе керна сосредоточено около 12% всего заряда, внутренняя часть мезонного облака несет около 60%, наружный слой — 28% заряда (см. рис. 4, слева).

Нейтрон электрически нейтрален только в среднем. Внутренние части его, как полагают, заряжены отрицательно, наружные — положительно (см. рис. 4, справа).

Новые элементарные частицы

В начале двадцатого столетия многие физики мечтали найти фундаментальные частицы, составляющие основу вещества: неизменные кирпичи мироздания. Осуществление этой мечты казалось близким и реальным. Но поиски ничего утешительного не принесли. Мысль В. И. Ленина о неисчерпаемости электрона и атома подтвердилась последующим развитием физики. Выяснилась не только сложная структура «элементарных» частиц, но и само количество их неожиданно возросло. Кроме μ- и π-мезонов, найдены K-мезоны, промежуточные по массе между π-мезонами и нуклонами, а также гипероны разных сортов, более тяжелые, чем нуклоны. С открытием новых частиц связывают имена советских ученых — академика А. И. Алиханова и члена-корреспондента АН СССР А. И. Алиханьяна. Недавно в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) в результате тщательного изучения 40 тысяч фотографий была открыта новая частица — антисигма-минус-гиперон с массой около 2340 электронных масс. Общее число элементарных частиц, как зарегистрированных в опытах, так и тех, существование которых не вызывает сомнений, достигло круглой цифры — тридцати. Только семь из них (фотон, нейтрино, антинейтрино, электрон, позитрон, протон, антипротон) стабильны, остальные распадаются на более легкие частицы. Кроме тридцати вполне достоверных частиц, пред-

полагают существование еще нескольких — четырех или шести мезонов. Ученым предстоит немало потрудиться для определения роли и места в физике большинства элементарных частиц.

Античастицы

Не вдаваясь в подробности, скажем, что самая старая из известных элементарных частиц (электрон) также оказалась устроенной весьма сложно; структура и свойства электрона пока не изучены полностью. Электрон многолик. В зависимости от обстановки он обнаруживает различные качества. Одно из них, выскажи его кто-нибудь в начале двадцатого века, показалось бы абсурдным, упоминание о нем вызвало бы насмешки большинства физиков, отличающихся, как правило, острым языком. Речь идет о настолько интересном и теперь уже модном вопросе, что стоит подойти к нему издалека.

Еще в 1923 г. советский физик, ныне академик, Д. В. Скобельцын сделал на первый взгляд незначительное, но в действительности очень важное усовершенствование камеры Вильсона, имевшее огромные последствия для развития физики. Он поместил камеру Вильсона в магнитное поле. Заряженная частица, ионизируя переохлажденный пар какой-либо жидкости, оставляет в камере след капелек тумана, конденсирующихся на ионах. След можно фотографировать обыкновенным фотоаппаратом. Магнитное поле, введенное Д. В. Скобельцыным внутрь камеры, искривляет путь заряженной частицы. По кривизне можно определить заряд частицы, ее импульс, а иногда массу и энергию. Камера Вильсона приобрела весьма ценные качества и до сих пор верно служит исследованию физики частиц. Изучая торможение γ-частиц на различных веществах, Д. В. Скобельцын обнаружил на фотографиях следы частиц, совершенно идентичные следам электронов, но искривленные в противоположном направлении. Необычный след исходил из той же точки, в которой начинался след электрона. Пара следов выглядела симметричной галочкой. Все говорило о том, что наряду с отрицательным электроном существует электрон, равный ему по массе, но заряженный положительно. К сожалению, опыты Д. В. Скобельцына не были своевременно опубликованы, о них вспомнили только в

1932 г., когда Андерсон (США) обнаружил в космических лучах положительно заряженный электрон — позитрон.

Существование позитрона было предсказано теоретически. В 1928 г. двадцатишестилетний английский теоретик Поль Андриен Морис Дирак осуществил работу чрезвычайной важности. Он построил точную теорию движения электрона, удовлетворяющую как квантовой механике, так и теории относительности Эйнштейна. Теория Дирака блестяще объяснила многие, до тех пор непонятные явления и предсказала несколько новых эффектов. В частности, из нее вытекала возможность существования электронов с отрицательной энергией. После размышлений над этим результатом теоретики пришли к выводу о существовании положительно заряженного электрона, способного аннигилировать — превращаться в паре с обычным электроном в два кванта света с энергией по 0,5 *Мэв* каждый (рис. 3). В дальнейшем опытами Андерсона и другими работами эти выводы блестяще подтвердились, еще раз продемонстрировав силу научного предвидения.

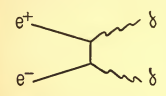


Рис. 3. Схематическое изображение процесса аннигиляции электрона с позитроном. Энергия каждого из γ-квантов равна приблизительно 0,5 *Мэв*

Способность электрона возникать в паре с позитроном из γ-кванта и превращаться вместе с ним в кванты, γ-кванты,— вероятно, самое поразительное свойство электрона.

Благодаря способности к аннигиляции позитрон стали называть античастицей электрона. Все элементарные частицы, за исключением фотона и нейтрального π-мезона, являющихся одновременно и частицами и античастицами, имеют парные им античастицы. У протона есть антипротон, у нейтрона — антинейтрон. Античастица сигма-минус-гиперона — антисигма-минус-гиперон. В общее число частиц (30), о котором говорилось выше, входят и античастицы. Античастица, как думали, отличается от частицы только противоположным зарядом, если она его имеет, и способностью к аннигиляции с парной частицей. В остальном они совершенно неразличимы. В конце статьи мы опишем одно существенное различие

между ними, предсказанное советским физиком лауреатом Нобелевской премии академиком Л. Д. Ландау.

Для создания тяжелой античастицы, точнее пары частица — античастица, необходимо замедлить, столкнув друг с другом, частицы, например протоны, с относительной кинетической энергией, равной, согласно известному соотношению Эйнштейна, произведению массы покоя создаваемых частиц на квадрат скорости света. Энергия и масса движения сталкивающихся частиц превратятся в энергию и массу покоя вновь образованных. Антипротон и антинейтрон были открыты в США на ускорителе, сообщающем протону энергию в 6,2 млрд. электронвольт (6,2 *Бэв*). В Дубне работает ускоритель, позволяющий придавать протонам энергию в 10 *Бэв*. До ввода в строй в Швейцарии ускорителя на 30 *Бэв* советский был самым мощным в мире.

О строении керна нуклона

Взаимодействие между электроном и позитроном в процессе аннигиляции носит злектромагнитный характер, на что указывает его результат: образование γ-квантов — злектромагнитных волн. Связь и взаимодействие между нуклонами, как уже говорилось, имеют мезонный характер. Мезонные взаимодействия называют сильными. Между нуклоном и антинуклоном также существует сильное взаимодействие. Они аннигилируют на π-мезоны, называемые иногда квантами сильного взаимодействия. Здесь мы подходим к очень интересному вопросу: если нуклон с антинуклоном аннигилируют в π-мезоны, значит осуществим и обратный процесс. Можно, затормозив π-мезон очень большой энергии на другом π-мезоне, создать пару: нуклон — антинуклон. В момент рождения пары столкнувшиеся π-мезоны обладают огромным силовым полем, квантом которого можно считать рождающуюся пару. Следовательно, не только π-мезон может быть квантом взаимодействия нуклонов, но и пара (нуклон — антинуклон) — квантом взаимодействия мезонов. Между элементарными частицами, таким образом, существует взаимная связь.

С этой точки зрения керн, или сердцевина, нуклона может трактоваться как зона, в которой существует поле, квантом которого оказывается нуклон-антинуклон-





Рис. 4. Схематическое изображение модели протона и нейтрона:

Слева — протон. Большая часть массы протона сосредоточена в сердцевине — керне. В зоне керна содержится около 10% заряда. Остальной заряд несет мезонное вещество, окружающее керн. Внутренняя часть мезонного облака более плотная, заряжена примерно вдвое сильнее наружной;
справа — нейтрон. В целом электрически нейтрален. Керн его слабо заряжен отрицательно. Внутренняя часть мезонной оболочки несет отрицательный заряд, наружная поверхность нейтрона слабо заряжена положительно. В среднем положительный заряд равен отрицательному

ная пара (рис. 4). Несущественно, что масса керна — нуклон-антинуклонного кванта — меньше массы нуклона и антинуклона, вместе взятых. В процессе взаимодействия, приводящего к рождению пары, масса может возрастать за счет массы движения частиц.

Важно, что в обыкновенных частицах содержатся все необходимые материалы для рождения античастицы. Но, с другой стороны, нуклон-антинуклонное поле керна частицы чем-то отличается от поля античастицы. Керны двух нуклонов отталкиваются один от другого, тогда как керны нуклона и антинуклона, встречаясь, аннигилируют. Похоже на то, что керн нуклона и керн антинуклона состоят из одного и того же вещества, находящегося в разных состояниях, они отличаются один от другого некими, пока неизвестными квантовыми числами.

Забравшись в дебри, в которых даже специалисты ориентируются не слишком свободно, во всяком случае дойдя до вопросов, по которым пока еще нет ни единого мнения, ни достаточного экспериментального материала,

приостановим на этом описание отдельных ядерных частиц и обратимся к ядру как ансамблю из некоторого числа нуклонов. Ядро в целом полно интереснейших и очень важных в практическом отношении явлений.

Капельная модель ядра и ядерные реакции синтеза

Нуклоны, как отмечалось, действуют друг на друга на очень малых расстояниях, каждый из них взаимодействует лишь со своими соседями. Это свойство ядерных сил позволило советскому ученому члену-корреспонденту АН СССР Я. И. Френкелю уподобить атомное ядро капле жидкости, в которой частицы тоже взаимодействуют лишь со своими ближайшими соседями. Исходя из такого представления, Я. И. Френкель и независимо от него Нильс Бор в 1939 г. описали механизм деления урана.

Но возвратимся к описанию ядра. Для удаления нуклона из ядра требуется энергия, равная его энергии связи. Следовательно, если в ядро ввести нуклон, внутри ядра выделится энергия, равная энергии связи нуклона. Ввести в ядро протон очень трудно: он, как и ядро, заряжен положительно, и для преодоления электростатических сил отталкивания протон надо предварительно ускорить. Например, для преодоления сил отталкивания между протоном и дейтроном (заряд каждого из них равен единице) протону надо сообщить энергию более 0,5 *Мэв*. С увеличением заряда необходимая энергия возрастает пропорционально произведению зарядов сталкивающихся частиц. Поэтому, как будет видно в следующем разделе, очень удобным для ядерных реакций деления оказался нейтрон, не имеющий заряда и беспрепятственно проникающий в ядро.

Попав в ядро, нейтрон выделяет, как уже отмечалось, около 8 *Мэв* энергии, которая идет на нагревание ядра. Эта энергия из ядра уходит, например, в виде γ-квантов. Излученные из ядра γ-кванты уносят с собой массу, равную их энергии, разделенной на квадрат скорости света. Масса ядра, принявшего нуклон и отдавшего энергию возбуждения (равную энергии связи), оказывается меньше массы первоначального ядра и нуклона. Масса ядра, как видно из приведенного примера, меньше суммы масс составляющих его нуклонов. Эта разница, называемая

дефектом массы, тем выше, чем больше было выделено энергии при образовании ядра, чем ближе сдвинуты друг к другу нуклоны внутри ядра и чем плотнее они упакованы. Наиболее плотную упаковку имеют ядра, расположенные в середине периодической системы элементов — примерно от кремния ($Z = 14$) до олова ($Z = 50$). С точки зрения капельной модели это понятно: если нуклонов мало, их трудно расположить так, чтобы они плотно заняли наиболее выгодный объем — сферу. Фигура, образованная из них, будет вытянутой (дейтрон) или «угловатой». Для образования правильной сферы надо располагать сравнительно большим числом нуклонов. Следовательно, соединив два очень легких ядра и увеличив этим общее количество нуклонов, можно достичь более плотной их упаковки. Среднее расстояние между ними сократится, выделится некоторое количество энергии. Так осуществляются ядерные реакции синтеза. Для соединения двух легких ядер необходимо, конечно, преодолеть силы их электростатического отталкивания. Наиболее подходящим для реакции ядерного синтеза материалом служит дейтерий и нестабильный изотоп водорода — тритий с массовым числом $A = 3$, превращающийся наполовину в He^3 за десять лет — срок, вполне приемлемый для практического применения. При средней температуре вещества в несколько сот миллионов градусов реагирует заметное количество частиц, обладающих кинетической энергией, превышающей среднее значение.

Дейтерий с дейтерием или дейтерий с тритием соединяются, образуя He. В реакции даже высвобождается один нейтрон, который тоже может участвовать в реакции. Пока хорошо освоена быстрая реакция синтеза — взрыв водородной бомбы. Непрерывная реакция, энергию которой можно отвести и направить для промышленного использования, пока не осуществлена. Над нею работают физики всего мира. Решение проблемы ядерного синтеза для мирных целей будет, вероятно, иметь революционные последствия для человеческого общества, которые превзойдут все самые смелые фантазии и пророчества.

Реакция деления

Тяжелые ядра тоже упакованы менее плотно, чем средние по массе. Здесь в них начинает сказываться большое число протонов, отталкивающихся друг от друга благодаря одинаковому по знаку электрическому заряду. Тяжелые ядра не только упакованы менее плотно, но и содержат относительно большее количество нейтронов, чем средние. При делении тяжелого ядра нуклоны, распределившись на два средних по массе ядра, упаковываются плотнее, чем раньше. При этом выделяется энергия, бо́льшая часть которой превращается в кинетическую энергию новых ядер, а меньшая излучается. Но средние по массе ядра содержат относительно меньшее число нейтронов, чем тяжелые. Часть из теперь уже «лишних» нейтронов вылетает из ядра, остальные, испуская электроны, превращаются в протоны: равновесие между протонами и нейтронами восстанавливается. Процесс испускания электронов может иметь несколько ступеней и продолжаться долго (в ядерных масштабах времени), поэтому вновь образующиеся ядра радиоактивны, их называют радиоактивными осколками. Происхождение этого термина ясно: ядро разбивается на осколки.

Механизм деления понятен из капельной теории ядра. Нейтрон, входя в ядро делящегося вещества (U^{233}, U^{235} или искусственно созданный элемент — Pu^{239}) и отдавая энергию связи, нагревает его. Ядро «кипит», оно пульсирует. Вследствие сравнительно слабой упаковки нуклонов силы притяжения между ними относительно меньше, чем в более плотных ядрах. Пульсируя, ядро может вытянуться и разорваться на две части приблизительно равной массы. Освобождающиеся при этом нейтроны продолжают реакцию, которая носит цепной, т. е. прогрессивно нарастающий характер. Для деления перечисленных выше ядер достаточно энергии возбуждения порядка 8 *Мэв*; ее поставляет проникший в ядро медленный нейтрон. Но существуют ядра, для деления которых этой энергии мало, например U^{238}. Ему необходимо сообщить не менее 9 *Мэв*. Поэтому при бомбардировке медленными нейтронами он не делится. Недостающую энергию нейтрону необходимо сообщить каким-либо способом. Очевидно, на практике такое свойство U^{238} представляет неудобства и поэтому его отделяют от более ценного U^{235}.

Реакции деления изучены очень хорошо. Широкой публике это интересное свойство материи стало известно после появления атомных бомб, энергия которых получается за счет расщепления ядер урана и плутония. Один килограмм расщепляющегося урана дает энергию, примерно равную энергии взрыва 20 тыс. *т* тротила или теплоте сгорания 2 тыс. *т* бензина.

Остается лишь упомянуть об открытии, окончательно доказавшем возможность расщепления урана. Немецкие физики Ган и Штрасман в 1938 г. нашли в уране, облучаемом нейтронами, барий ($Z = 56$) и лантан ($Z = 57$) — элементы, которые приблизительно вдвое легче, чем уран. Поскольку уран до облучения был химически чистым, эти элементы могли оказаться в нем только вследствие расщепления урана. Открытие Гана и Штрасмана было подготовлено исследованиями Ирен и Фредерика Жолио-Кюри, обнаруживших в 1934 г. искусственную радиоактивность элементов, а затем нашедших лантан в уране, облучаемом нейтронами. Следует упомянуть еще об одном крупном открытии в этой области.

На одном из заседаний Ученого совета Ленинградского физико-технического института в начале 1940 г. с внеочередным заявлением взволнованно выступил директор Ленинградского радиевого института академик В. Г. Хлопин, сделавший так много для развития атомной науки в СССР. Он объявил об открытии молодыми учеными Г. Н. Флеровым и К. А. Петржаком самопроизвольного деления урана. Способность урана самопроизвольно делиться, правда очень медленно, без внедрения в него нейтрона, имеет большое значение для теории атомного ядра; она указывает на вероятностный характер процесса. Впоследствии это свойство оказалось связанным со способностью ядер делиться под действием нейтронов различной энергии.

Цепная реакция деления хорошо регулируется, скорость ее может по желанию физиков задаваться очень большой и сколь угодно малой. Это обстоятельство позволяет широко применять реакцию расщепления в мирных целях. Особенно больших успехов в атомной технике достиг Советский Союз, идущий в мирном использовании атомной энергии впереди других стран. Наглядным доказательством этого служит пуск в нашей стране первой в мире атомной электростанции, постройка и успеш-

ная эксплуатация первого в мире атомного ледокола «Ленин», одновременно являющегося самым мощным в мире кораблем с атомными установками.

Большие заслуги в развитии атомной науки и техники принадлежат академику И. В. Курчатову, руководившему многие годы научными исследованиями в этой области. Он является автором крупных открытий: например, в 1936 г. им была открыта ядерная изомерия.

Оболочечная модель ядра

Но вернемся к модели атомного ядра. Существуют факты, противоречащие его капельной структуре. Ядро тоже проявляет многоликость. Ядра с четным числом протонов прочнее ядер с нечетным их числом — распространенность их в природе значительно выше. Четное число нейтронов в ядре тоже увеличивает его прочность. Но из всех ядер самыми стабильными, обладающими наибольшей энергией связи, оказываются ядра с числом протонов или нейтронов 2, 8, 14, 20, 50, 82, 126. Эти числа, как и ядра, ими обладающие, называют «магическими» в знак их особой прочности. «Магичность» ядер проявляется, в частности, в «нежелании» захватывать нейтроны: сечение захвата нейтронов, сопровождающегося излучением γ-квантов, у них необычайно мало. Энергия α-частиц α-радиоактивных магических ядер тоже необычайно мала. Обладают они и другими свойствами, указывающими на их повышенную прочность. По аналогии с электронными уровнями в атоме, полагают, что и в ядре существуют уровни или оболочки, заполняемые парами нуклонов (два протона, два нейтрона), спины которых антипараллельны. Ядра с полностью заполненными оболочками оказываются наиболее прочными, они приобретают «магичность».

Оболочечное строение ядра противоречит его капельной структуре, подтверждаемой многими экспериментальными фактами. Но физики находят области, в которых справедлива, конечно приближенно, каждая из моделей. Если ядро не возбуждено, не нагрето, то нуклоны в нем располагаются по оболочкам, в соответствии с законами квантовой механики. Впуская нейтрон в ядро и таким способом нагревая его, срывают нуклоны с оболо-

чек, так сказать, с насиженных мест. Хаотическое движение нуклонов в нагретом ядре придает ему свойства жидкой капли. Но есть факты, противоречащие обеим моделям. Мы здесь о них говорить не будем.

Сильные и слабые взаимодействия

Из приведенного нами материала ясно видна справедливость ленинского предсказания о неисчерпаемости электрона и атома. В заключение остановимся на одном из последних открытий, уже сейчас имеющем исключительное значение для науки о строении вещества. Речь идет об открытии несохранения четности при слабых взаимодействиях.

Мы уже знакомы с двумя видами взаимодействия между элементарными частицами. Это, во-первых, электромагнитные взаимодействия, возникающие, например, между электроном и позитроном, приводящие их к аннигиляции с рождением двух γ-квантов; во-вторых, мезонные — сильные взаимодействия, характеризующиеся малым временем, в течение которого действуют ядерные силы большой величины. Нуклон, обладающий большой энергией, пролетая мимо другого нуклона, подвергается действию ядерной силы, отклоняющей его от первоначального направления, в течение времени, равного диаметру нуклона, разделенному на скорость нуклона (в данном случае близкую к скорости света). Произведя деление, получаем время действия силы порядка 10^{-23} сек., характерное для сильных взаимодействий. Но распад элементарных частиц требует гораздо большего времени. Если исключить три элементарные частицы, распадающиеся в результате электромагнитного взаимодействия (это нейтральный π-мезон со временем жизни меньше 10^{-15} сек., сигма-ноль и антисигма-ноль частицы, распадающиеся за время меньше 10^{-18} сек.), то наиболее короткоживущие частицы распадаются со временем порядка 10^{-10} сек. Остальные живут еще дольше. Как видно, самое малое время распада в 10^{13} раз превышает время, характерное для сильных взаимодействий. Отсюда можно заключить, что силы, приводящие к распаду с таким относительно большим временем, значительно слабее мезонных. Они значительно меньше и электромагнитных. Поэтому взаимодействия, приводящие к распаду

элементарных частиц с появлением β-частиц и мезонов, называют слабыми. Распад частиц происходит, если есть запас энергии, т. е. когда масса распадающейся частицы больше суммы масс частиц, на которые она распадается. Так, масса нейтрона, равная 1839 *эм*, больше суммы массы протона и электрона, равной $1836 + 1 = 1837$ *эм*. Разница в две электронных массы создает возможность рождения нейтрино и приобретения продуктами распада некоторой кинетической энергии. Но запас энергии — условие необходимое, но недостаточное для распада. Существует ряд ограничений — квантовых запретов,— о которых мы здесь говорить не будем.

Быстрые распады, связанные с сильными взаимодействиями, доминируют над медленными процессами, обязанными слабым взаимодействиям, если те и другие могут происходить в данном конкретном случае. Внутри ядра частицы ведут себя иначе, чем вне его. Нейтрон может стать стабильным: в дейтроне или ядре гелия он живет не распадаясь сколь угодно долго. Вместе с тем, если в ядре оказывается «слишком много» нейтронов, часть из них распадается, превращаясь в протоны. Этот процесс, как нам уже известно, называют бета-минус-радиоактивностью. Бета-радиоактивные ядра могут иметь очень большие периоды полураспада. Так, время полураспада существующего в естественном виде K^{40} составляет 1,3 млрд. лет. Когда в ядре «слишком большим» оказывается количество протонов, появляется бета-плюс (позитронная) радиоактивность, открытая Ирен и Фредериком Жолио-Кюри. Ядро испускает позитрон, и один протон в нем превращается в нейтрон, несмотря на то, что масса протона меньше суммы масс нейтрона и позитрона. В ядре свои законы; там, вероятно, существует взаимопомощь: соседние нуклоны, отдавая распадающемуся протону часть энергии и массы, помогают ему образовать частицы, которые он никогда не произвел бы, оставаясь в одиночестве.

Сохранение и несохранение четности

Сохранепие пространственной четности имеет очень простой физический смысл: при ядерных превращениях существует пространственная симметрия. Природа не знает, где правая сторона, где левая. Этот вывод повсе-

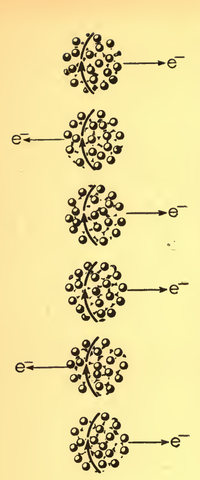


Рис. 5. Схематическое изображение нарушения пространственной симметрии при β-распаде Co^{60}. Ядра Co^{60}, если рассматривать только те из них, которые испускают электроны вдоль оси вращения, излучают β-частицы преимущественно назад (в правовинтовой системе отсчета)

дневно подтверждается на явлениях крупного масштаба. В микромире в этом неоднократно убеждались, изучая электромагнитные и сильные взаимодействия.

Обдумывая непонятные явления, имеющие место при слабых взаимодействиях, молодые ученые Ли Цзун-дао и Янг Чжень-нин решили проверить, сохраняется ли четность и в этом случае, и предложили для выяснения вопроса сделать ряд очень тонких опытов.

Суть одного из них, говоря несколько упрощенно, состоит в следующем. Вообразим ядро, испускающее электрон (и, конечно, нейтрино) и имеющее спин. Частица вращается, поэтому не исключено, что из экваториальной зоны электрон будет вылетать как-то иначе, чем из полюсов. Но между двумя полюсами нет никакой разницы. Само понятие направления вращения условно и относительно. Для определения направления спина мы пользовались правовинтовой системой координат. При левовинтовой системе спин будет направлен в противоположную сторону. Если существует пространственная симметрия — сохраняется пространственная чет-

ность,—то частица не знает, в какую сторону вдоль оси вращения ей испускать электрон. Наблюдая множество распадов, мы всегда отметим, что одинаковое число электронов вылетает из каждого полюса. Для удобства наблюдения все частицы можно выстроить спинами в одну сторону, например влево. Тогда, если сохраняется четность, направо и налево будет вылетать в среднем одинаковое число электронов. Такой опыт осуществили. Выстроили (поляризовали) ядра кобальта (Co^{60}) и обнаружили, что электроны вылетают преимущественно назад в правовинтовой системе, т. е. в сторону, противоположную направлению спина в этой системе отсчета (рис. 5). К огромному замешательству физиков выявилось, что природа каким-то способом отличает правую сторону от левой.

Комбинированная инверсия

Пространственная симметрия (четность), как показали последующие эксперименты, нарушается также и при распаде заряженных π-мезонов и других элементарных частиц; несохранение четности характерно вообще для слабых взаимодействий. Физики стали искать выход из трудного положения. Л. Д. Ландау в разгар событий, еще до появления достаточного экспериментального материала, предложил идею так называемой комбинированной инверсии, сформулировав ее на одной страничке физического журнала. Суть идеи Л. Д. Ландау состоит в том, что нельзя рассматривать частицы отдельно от античастиц, вещество от антивещества. Если эти два вида материи рассматривать совместно, нарушения пространственной симметрии не будет. Выстроив античастицы (того же сорта, что и частицы) так же, как были выстроены частицы, мы обнаружим для них нарушение симметрии в вылете электронов (теперь это позитроны) в противоположную сторону. Если таким образом наблюдать поочередно частицы и античастицы, не обращая внимания на знак заряда вылетающих электронов, нарушения пространственной симметрии не будет (рис. 6). Идея комбинированной инверсии нашла косвенные экспериментальные подтверждения. Правда, ее не удалось проверить на опытах с распадом античастиц из-за их малой доступности.

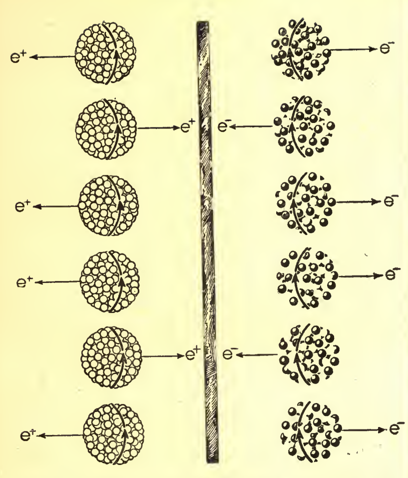


Рис. 6. Схематическое изображение комбинированной инверсии при слабых взаимодействиях. Пространственная симметрия при распаде античастиц нарушается в сторону, противоположную ее нарушению при распаде частиц. Если античастицы считать частицами, отраженными в зеркале, то позитроны при β-распаде античастиц будут вылетать назад в левовинтовой системе координат. При распаде частиц они вылетают назад в правовинтовой системе. Наблюдая распады равного числа частиц и античастиц, ориентированных одинаково в одной и той же системе отсчета, наблюдатель будет видеть в среднем одинаковое число электронов, вылетающих вправо и влево, если не будет обращать внимания на знак их заряда

Разрешая противоречия, наука добивается прогресса. Старое представление о сохранении пространственной симметрии, казавшееся незыблемым, для слабых взаимодействий оказалось неправильным. Пока не удалось выяснить, откуда вещество «знает», где правая и где левая сторона. Однако распутывая эту сложную загадку, ученые нашли новое существенное различие между веществом и антивеществом, кроме того, выявили интересное качество природы: она обнаруживает симметрию более высокого порядка, чем пространственную, и «не любит», когда вещество рассматривается отдельно от антивещества.

Природа поставила перед физиками много новых вопросов, решение которых, надо надеяться, принесет большую пользу человечеству.

Пространственная структура атомного ядра*

Доктор физико-математических наук
Я. А. Смородинский

Открытие ядерной модели

Ядерная физика возникла в тот день, когда Эрнест Резерфорд, изучая рассеяние α-частицы атомами, обнаружил, что модель атома Томсона неверна и что положительный заряд не «размазан» непрерывно по всему атому, а сконцентрирован в его центральной части — ядре. Это было революционное событие, которое изменило весь ход развития физической науки.

Открытие электронов — частиц, в которых сконцентрировано все отрицательное электричество, было только первым этапом в крушении старых представлений об атоме. Физики начала XX в. обычно представляли себе атом как равномерно заряженный положительным электричеством шарик, в котором колеблются отрицательные электроны. Лишь пространство между атомами считалось пустым. Резерфорду удалось глубже проникнуть в тайны строения атома и обнаружить, что атом, собственно говоря, столь же «пуст», как и солнечная система, и что практически вся его масса содержится в ядре.

Это открытие ознаменовало рождение планетарной модели атома. Такая модель противоречила самым элементарным законам классической физики, с неизбежностью приводившим к невозможности устойчивого обращения заряженного электрона вокруг ядра без излучения. Тем не менее, она оказалась почти правильной.

* «Природа», 1959, № 6.

Появление модели атома Резерфорда сразу же поставило перед физиками ряд вопросов: какие размеры имеет ядро, как оно устроено, из чего состоит, какие силы удерживают положительные заряды внутри столь малой области?

Собственно говоря, все эти вопросы можно было поставить (и они уже ставились) для электрона. Но попытки ответить на них приводили к непреодолимым трудностям. Представить себе электрон в виде точки, не имеющей размеров, было невозможно — такая точка имела бы бесконечно большую энергию; представить себе электрон в виде шарика также нельзя — непонятно, какие силы будут удерживать его против сил кулоновского отталкивания. Все эти затруднения остались практически непреодоленными и до настоящего времени. Но мы теперь знаем, что если электрон и имеет размеры, то они очень малы и, может быть, не влияют на результаты тех опытов, которые пока проводились.

Задача о ядре существенно отличалась от задачи об электроне. Было хорошо известно, что ядро — не самая маленькая положительная частица, такой является лишь ядро водорода — протон. Ядра всех остальных атомов с самого начала рассматривались как сложные системы, состоящие из протонов и, как сейчас ясно, из нейтронов.

Каковы же размеры этой системы?

Вскоре после открытия Резерфорда был получен и первый грубый ответ на этот вопрос. Гейгер и Марсден, изучая, как отклоняются α-частицы, сталкиваясь с атомами, показали, что закон Кулона, описывающий электрическое взаимодействие между ядром и α-частицей, справедлив вплоть до очень малых расстояний между сталкивающимися частицами. Отсюда можно было заключить, что радиус даже очень тяжелых ядер, таких, как золота, во всяком случае меньше, чем $4 \cdot 10^{-12}$ *см*. Это была первая оценка размеров ядра. Она была не очень сильно завышена — радиус ядра золота составляет в действительности около $0{,}8 \cdot 10^{-12}$ *см*.

Ядерные силы

Нет смысла описывать различные попытки определения радиусов ядер в их исторической последовательности. В этом вопросе прогресс был очень медленным, и

лишь в последние 10 лет задачи об определении размеров ядер — и несколько неожиданно возникший вопрос об их форме — получили удовлетворительное решение. Поэтому мы сразу перейдем к современному состоянию дела. Но прежде всего необходимо более точно выяснить: что мы должны понимать под размером ядра и какие свойства ядра связаны с такой величиной.

Когда речь идет о размерах обычных макроскопических предметов, то понятие их размеров (длины, высоты, ширины), казалось бы, не требует каких-либо дополнительных разъяснений. Однако это будет действительно так, если только не пытаться определить эти величины слишком точно.

Весьма легко измерить длину, например, неочиненного карандаша с точностью до 0,5 *мм*. Однако если попытаться сделать это более точно, то непременно столкнешься с тем, что шероховатости на торцах карандаша имеют разную величину в разных местах и, строго говоря, можно определить лишь расстояние между двумя заданными точками на двух торцах. Но и это еще не все. Если потребовать определения этого расстояния с точностью до ангстремов (10^{-8} *см*), то мы натолкнемся на то, что само понятие поверхности теряет смысл; ведь молекулы, из которых состоит древесина, колеблются, и никакой неподвижной поверхности вообще не существует, а потому точно может быть задано только расстояние между двумя точками пространства, а не торцами карандаша. Таким образом, само понятие длины карандаша определено не точно. Оно имеет смысл лишь до тех пор, пока мы не требуем, чтобы неточность измерения была существенно меньше 10^{-6}%. Эти вполне элементарные соображения становятся весьма существенными, когда мы переходим к таким малым объектам, как атомное ядро. Оказывается, что только весьма своеобразные свойства сил, которые удерживают эту систему от развала, позволяют говорить о ее размерах.

Ядерные силы, которые действуют между нуклонами — протонами и нейтронами, резко отличаются по своим свойствам от кулоновских сил. Притяжение между двумя разноименно заряженными частицами убывает как квадрат расстояния и остается заметным и на больших макроскопических расстояниях. Напротив, силы взаимодействия между двумя нуклонами, которые очень велики на малых

расстояниях, убывают с расстоянием несравненно быстрее. Грубо можно сказать, что сила притяжения между двумя нуклонами изменяется с расстоянием r как $\frac{1}{r} e^{-r/a}$, где a примерно равно $1{,}2 \cdot 10^{-13}$ *см* (физики часто используют новую единицу длины — 1 *ферми* $= 10^{-13}$ *см*, так что $a = 1{,}2$ *ферми*).

Это значит, что уже на расстояниях в несколько ферми нуклоны практически не взаимодействуют друг с другом. Такие силы называют «короткодействующими» с радиусом действия порядка a, в отличие от электромагнитных сил — сил дальнодействия, радиус которого бесконечно велик.

Если рассмотреть теперь силы, которые действуют между протоном и ядром, то нужно будет различать две области. Пока расстояние до ядра существенно больше, чем радиус действия ядерных сил a, на протон будут действовать только кулоновские силы. По мере того как расстояние до ядра будет приближаться к величине a, заметное влияние оказывают ядерные силы, которые при еще меньших расстояниях будут преобладающими.

Таким образом, опыты по рассеянию в принципе могут определить область, внутри которой действуют большие ядерные силы. Благодаря тому, что область их действия простирается на небольшое расстояние, величину этой области естественно считать равной размерам ядра. Из изложенного видно и то, какую точность имеет это понятие. Ясно, что границы ядра определены с точностью до величины порядка a и если бы a было существенно больше или силы убывали с расстоянием не экспоненциально, то границы ядра просто не существовало бы.

Следовательно, уже сам факт существования у ядра достаточно резкой границы не тривиален и из него вытекают важные следствия. Говоря о границах ядра, никогда не следует забывать, что они размыты (физики говорят — диффузны). Этот факт также имеет важное значение для объяснения результатов опыта. Удивительно, что о диффузности поверхности ядра физики вспомнили очень поздно, и лишь в последние 4—5 лет это понятие получило общее признание.

Если короткодействующие ядерные силы не дают ядру разлететься, то что мешает нуклонам под действием этих же сил собраться практически в точку — упасть друг на

друга? Это не может произойти из-за существования очень важного свойства квантовых систем — принципа Паули: в каждом квантовом состоянии может находиться только одна частица. В применении к нашему случаю можно сказать, что принцип Паули не разрешает, чтобы все нуклоны находились в одном и том же месте пространства. Это же свойство, как известно, обеспечивает и устойчивость атомов, не дает всем электронам упасть на самую глубокую орбиту.

Плотность ядерного вещества

Важным свойством ядер, обнаруженным уже очень давно, является их постоянная плотность. Как оказалось, объем любого ядра с большой степенью точности пропорционален числу нуклонов, из которых ядро состоит. Если, как это долго считалось, принять, что ядро имеет форму шара, то объем ядра определяется формулой

$$V = V_0 A,$$

где A — число нуклонов в ядре, а V_0 — объем, приходящийся на один нуклон ($1/V_0$ — число нуклонов в единице объема — плотность ядерного вещества).

Постоянство V_0 было бы не удивительным для системы из очень большого числа частиц. Ведь никого же не удивит, что плотность воды в капле и в ведре одна и та же. Но когда это свойство проявляется в системе, состоящей всего из десятка сильно взаимодействующих частиц, оно заслуживает быть особо отмеченным. Забегая вперед, посмотрим, какую величину имеет «удельный объем» V_0.

Обычно принято вводить в формулу не объем ядра, а его радиус R. Так как

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3,$$

то R, очевидно, должен быть пропорционален корню кубическому из числа частиц (r_0 — коэффициент пропорциональности)

$$R = r_0 A^{1/3}.$$

Удельный объем связан с r_0 соотношением

$$V_0 = \frac{4}{3}\pi r_0^3.$$

Современные данные дают для r_0 значение порядка 1,1—1,2 *ферми* (неопределенность связана с диффузностью границы ядра). Таким образом, радиусы ядер лежат в интервале от 1,1—1,2 *ферми* для протона до ~7—8 *ферми* для самых тяжелых ядер или с учетом диффузной границы до ~8—9 *ферми*. Для удельного объема V_0 мы получаем

$$V_0 \approx 7 \cdot 10^{-39}\, см^3 = 7\ (ферми)^3$$

или для плотности

$$1/V_0 \approx 0{,}15\, \frac{нуклон}{ферми^3}.$$

Могло бы показаться, что ядро должно быть плотно «забито» веществом. Однако, как мы увидим в дальнейшем, сами нуклоны занимают сравнительно малый объем.

«Радиус» нуклона (точно что это такое, мы определим дальше) составляет примерно 0,7 *ферми* и его «объем» около 1,5 *ферми*^{3}. Этот объем в пять раз меньше удельного объема V_0, приходящегося на один нуклон в ядре, так что нуклоны в ядре вовсе не так уж плотно упакованы.

Из того, что говорилось раньше, должно следовать, что для очень легких ядер, когда диффузность ядра становится сравнимой с его радиусом, нельзя уже ожидать такой прямой связи между объемом ядра и числом нуклонов в нем. И действительно, такой эффект наблюдали, например, у ядер Li^6 и Li^7, у которых радиусы отличаются сравнительно сильно [больше, чем в отношении $(6/7)^3$].

Радиус ядра из α-распада

До тех пор, пока в распоряжении физиков не было искусственно созданных пучков частиц, единственным источником сведений о размерах ядер было рассеяние частиц, излучаемых естественными радиоактивными элементами. Однако энергия таких частиц сравнительно мала, и они не могут подойти близко к ядру из-за кулоновского отталкивания. Поэтому-то в опытах Резерфорда и его последователей можно было лишь очень грубо оценить размер ядра. Однако существуют такие условия, когда α-частица, несмотря на недостаточную энергию, все же попадет в область действия ядерных сил. Это происходит в процессе вылета α-частицы ядра при радиоактивном распаде. Поле сил, в котором движется α-частица, вылетающая

из ядра, имеет характерную форму «барьера» (рис. 1). Вплоть до поверхности ядра — это кулоновские силы отталкивания, внутри ядра — ядерные силы притяжения. Благодаря этому по мере удаления α-частицы от центра ядра потенциальная энергия ее сначала растет, достигает максимума, а потом падает до нуля на бесконечности. Прохождение α-частицы (с энергией меньше той, которая отвечала бы максимуму) через такой барьер («туннельный» переход) — одна из простейших задач квантовой механики, и если бы механизм образования α-частицы внутри ядра был известен теоретически, то из времени жизни α-излучателя можно было бы определить один параметр — положение максимума, которое и можно было бы принять за радиус ядра. При помощи этого метода и были проведены первые оценки радиусов ядер (основанные на некоторых более или менее правдоподобных предположениях о взаимодействии внутри ядра). Однако, строго говоря, такой метод дает не радиус ядра, а сумму радиусов ядра и α-частицы. Кроме того, ряд экспериментальных ошибок (неправильная идентификация α-переходов) привел к тому, что этот метод давал недостоверные результаты (не согласующиеся с общей закономерностью — законом $A^{1/3}$). Только теперь этот метод приведен в соответствие с другими, о которых речь будет идти ниже.

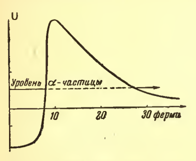


Рис. 1. Примерная зависимость потенциальной энергии взаимодействия α-частицы с ядром (потенциальный «барьер»). Энергия α-частицы показана горизонтальной линией. На рисунке видно, что «радиус» ядра не есть точное понятие, а связан с неопределенностью порядка «ширины» барьера

Радиус рассеяния нуклонов

Как только физики получили искусственные пучки нуклонов, возникла возможность новых измерений радиусов ядер. Наиболее полные измерения были сделаны тогда, когда при помощи реакции $H^2 + H^3 \rightarrow He^4 + n$

стали получать нейтронные пучки с энергией 17 *Мэв* большой интенсивности. Эти опыты позволили впервые вывести формулу для радиуса ядра:

$$R = (1{,}5\, A^{1/3} + 1{,}0)\ \textit{ферми}.$$

Постоянное слагаемое, не зависящее от числа частиц в ядре, объяснялось при этом как «радиус» действия ядерных сил нейтрона. К сожалению, оказалось, что эта формула, которой много пользовались и которая до сих пор встречается в литературе, в действительности совершенно не вытекает из опыта.

Опыты по рассеянию нуклонов вообще очень трудно интерпретировать. Трудность состоит в том, что мы очень мало знаем о ядерных силах, а потому не можем написать никакую теоретическую формулу, которая связывала бы размеры ядра с вероятностью рассеяния. Это можно было бы сделать лишь в очень упрощенной модели. Часто для этого используют модель «черного ядра», предполагая, что все без исключения частицы, попавшие в ядро, поглощаются им. Такая полностью поглощающая модель приводит к сечению рассеяния, равному πR^2. Эта модель и была использована для получения написанной выше формулы.

Однако сам вывод содержит два существенных порока. Прежде всего, ядро не является абсолютно поглощающим телом. Оно, как говорят, полупрозрачно — часть нейтронов, попавших в ядро, имеет заметную вероятность пройти его насквозь. С другой стороны, и это не менее важно, существенную роль (особенно при больших энергиях) играет диффузность (размытость) границы ядра. Поэтому, строго говоря, анализ опытов по рассеянию нуклонов должен ставить своей задачей не только определение радиуса ядра, но и определение других его характеристик — коэффициента поглощения и ширины его диффузной границы.

Этот более подробный анализ потребовал многих опытов с частицами, обладающими различными энергиями. Результаты оказались в согласии с несравненно более прямыми данными о рассеянии электронов ядрами, к описанию которых мы и перейдем.

Рассеяние электронов ядрами

Трудности теоретического анализа опытов с нуклонами были связаны главным образом с тем, что физикам точно не были известны законы взаимодействия и приходилось вводить в теорию упрощающие предположения. Кроме того, в теорию входил вопрос о размерах самой бомбардирующей частицы — нуклона или α-частицы, что также не улучшало точности анализа.

Всем было ясно, что нужно поставить опыты, которые были бы в принципе лишены всех этих недостатков. Ясно также, что если мы в качестве бомбардирующей частицы выберем электрон, то все трудности анализа исчезнут. Закон взаимодействия известен точно и описывается уравнениями Максвелла. О размерах электрона мы ничего не знаем и пока полагаем, что о них можно не заботиться[1]. Трудности состояли только в том, что физики, построив большое число ускорителей ядерных частиц, совсем не строили электронных ускорителей, которые создали бы пучки электронов с заданной энергией [2].

Между тем оказалось, что создание мощного линейного ускорителя привело к очень важным результатам. Такой ускоритель был построен в лаборатории в Станфорде (США), где два физика — Хофштадтер и Пановский открыли своими работами новую главу экспериментальной ядерной физики — исследование ядра при помощи электронного пучка.

Результаты этих исследований дали, наконец, возможность получить сведения о размерах ядер, не связанные ни с какими модельными представлениями.

Рассмотрим несколько более подробно вопрос о том, какую информацию о ядре в принципе может дать изучение рассеяния отрицательно заряженного электрона.

Прежде всего ясно, что в этих опытах изучается не распределение нуклонов в ядре, а распределение электрического заряда.

Если бы электрон подчинялся классической механике и его траекторию можно было определить на опыте, то, измеряя траектории, проходящие на разных расстояниях от центра ядра, можно было бы в принципе промерить электрическое поле в каждой точке. Подобно этому, например,

[1] Точнее об этом будет сказано в последнем разделе статьи.

[2] В существовавших бетатронах электроны создавались внутри машины, и задача вывода пучка из машины так и не была решена.

в оптике, если у нас есть достаточно тонкий пучок света, то мы при помощи микроскопа можем получить изображение объекта и измерить показатель преломления в любой его точке (заметим, что показатель преломления и потенциал связываются в квантовой механике простой формулой). Хорошо известно, что это можно делать только до тех пор, пока мы не интересуемся очень маленькими объемами. Только пока размеры образца существенно больше, чем длина волны падающего света, мы получаем на экране то, что принято в обыденной жизни называть изображением объекта. Длина волны видимого света составляет несколько тысяч ангстрем, поэтому при его помощи можно получать изображения предметов с размерами, грубо говоря, не менее нескольких микрон. Если же предмет меньше, то вместо изображения, в обычном смысле слова, получается лишь сложная диффракционная картина, которая совсем не похожа на сам предмет.

Совершенно такое же положение возникает в электронном микроскопе. Так как длина волны электронов существенно меньше, чем длины волн видимого света, то пучок электронов может дать изображение значительно меньшего предмета. Длина волны, согласно квантовой механике, для медленного электрона (скорость которого значительно меньше скорости света) определяется формулой

$$\lambda = \frac{\hbar}{mv} (v \ll c).$$

(Здесь $\hbar$ — постоянная Планка $= 10^{-27}$ *эрг·сек*, m — масса электрона $\sim 0{,}9 \cdot 10^{-27}$ *г*, а v — скорость.)

Таким образом, грубо, длина волны (в *см*) численно равна обратной величине скорости. Для электрона, ускоренного разностью потенциалов в 1 *в*, $\lambda = 2$ Å. Хотя эта величина и мала по сравнению с длиной волны видимого света, она огромна по сравнению с размерами ядер. Чтобы построить «электронный микроскоп» для ядра, надо использовать значительно более быстрые электроны. У электрона, скорость которого близка к скорости света, формула длины волны меняется, а именно [3]:

$$\lambda = \frac{\hbar c}{E} = \frac{\hbar}{mc} \cdot \frac{mc^2}{E}.$$

[3] Точная формула, пригодная для любых скоростей, $\lambda = \frac{\hbar}{p}$, где p — импульс электрона.

Здесь E — энергия электрона. Величина $\hbar/mc$ носит название комптоновской длины волны электрона и равна примерно $4 \cdot 10^{-11}$ *см*. Если вспомнить, что энергия покоя электрона mc^2 составляет около 0,5 *Мэв* ($0{,}8 \cdot 10^{-6}$ *эрг*), то получим, что

$$\lambdabar \approx \frac{2 \cdot 10^{-11}}{E\ (Мэв)}\ см.$$

Из этой формулы видно, что для получения возможности изучать ядро надо иметь электронный пучок с энергией в сотни, а еще лучше в тысячи или миллионы электронвольт.

Сейчас проведены опыты примерно до 600 *Мэв*. В разных лабораториях мира строятся ускорители, которые будут давать электроны с энергией до 6000 *Мэв*, что уже будет отвечать длине волны $\lambdabar = 0{,}3 \cdot 10^{-14}$ *см*. В опытах же, проведенных до сего времени, использовались электроны, длина волны которых была порядка размеров исследуемого ядра. Тем не менее и эти опыты дали много ценных сведений. Хотя в этом случае и нет возможности получить что-нибудь похожее на изображение объекта, вычисления могут дать важные сведения о рассеивающем объекте, так как получаемая диффракционная картина определяется его свойствами при помощи уравнений квантовой механики.

Законен вопрос: зачем вообще нужны тогда большие энергии, если можно все вычислить из данных, полученных в области меньших энергий? Действительно, если бы экспериментальные данные были абсолютно точны и все электроны имели строго одинаковую энергию, то в этих условиях обратная задача — определение свойств объекта по измеренному распределению интенсивности изображения (диффракционной картине) — имела бы точное решение.

В действительности, конечно, все измерения сопровождаются ошибками. Энергии электронов в пучке всегда имеют некоторый разброс. Измерения только тогда дают реальную информацию, когда они «устойчивы» относительно ошибок, т. е. тогда, когда небольшие экспериментальные ошибки не приводят к большим неопределенностям в результатах. Именно эта причина делает невозможным определение свойств ядра при малых энергиях электронов.

При больших длинах волн электронов даже сравнительно небольшие ошибки в опыте приведут к большой неопределенности в интерпретации. Только очень точные измерения позволили бы в этом случае получить нужные нам сведения. В обычных же условиях результаты опытов будут согласовываться с самыми разными представлениями.

С ростом энергии «устойчивость» повышается и требования к точности опытов смягчаются. Задача экспериментатора, планирующего опыты, и состоит в нахождении разумного компромисса между увеличением энергии и повышением точности измерений.

Мы можем теперь кратко описать результаты опытов, которые были проведены.

Так как длина волны электронов была по порядку величины сравнима с размерами системы, то опыты не могли дать очень много сведений о распределении плотности в ядре. В частности, из данных опытов почти ничего не следует о плотности в центральных областях ядра.

В отношении тяжелых ядер можно сказать, что опыты показали существование диффузной границы толщиной примерно 2—3 *ферми* и более или менее однородно заряженной «сердцевины» с радиусом, пропорциональным $A^{1/3}$.

Для описания этого распределения оказывается удобным выбрать кривую с двумя параметрами, хорошо передающую эти свойства, тогда из опытов можно определить значение параметров. Напоминаем, что точность опыта не позволяет различить сходные кривые. За «модельную» кривую выбирают обычно так называемое распределение Ферми:

$$\rho(r) = \frac{\rho(0)}{1 - e^{\frac{r-c}{t}}}.$$

Здесь ρ (0) — плотность в центре, c и t — параметры, определяемые из опытов. При $r \ll c$ плотность практически не зависит от расстояния, при $r \gg c$ и $r \gg a$ она быстро падает с расстоянием (как $e^{-r/a}$).

Эта формула довольно хорошо описывает распределение плотности для всех ядер с числом нуклонов больше 20, если принять следующие значения постоянных: $c = (1{,}07 \pm 0{,}02)\, A^{1/3}$ *ферми* («радиус» ядра); $t = (2{,}4 \pm 0{,}3)$ *ферми* (толщина диффузного слоя).

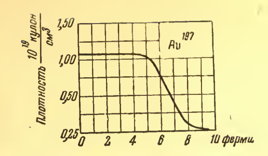


Рис. 2. Распределение плотности электрического заряда в ядре золота, полученное при помощи рассеяния электронов с энергией 183 *Мэв*. Кривая выбрана заранее в виде

$$\rho = \rho_0 \left[1 + e^{(r-c)/t}\right].$$

Параметры c и t определены из опыта; $c = 6{,}38$ *ферми*; $t = 2{,}32$ *ферми*; ρ_0 определяется полным зарядом ядра; $\rho_0 = 1{,}09 \cdot 10^{19}$ *кулон/см*$^3 = 0{,}109 \cdot 10^{-19}$ *кулон/ферми*^{3} (напомним, что заряд электрона равен $4{,}80 \cdot 10^{-10}$ CGSE $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *кулона*)

На рис. 2 изображена в качестве примера кривая $\rho(r)$ для золота. У более легких ядер, когда c и a становятся равными (а это происходит при $A \sim 10$—15), уже нет смысла разделять ядро на «сердцевину» и границу. В этом случае в распределении отсутствует плоское «плато» и его лучше описывать кривой другого типа.

Результаты опытов (пока еще не очень точных) можно, например, подогнать к кривой типа

$$\rho(r) = \rho(0)\left[1 + (z-2)\frac{r^2}{3a^2}\right] e^{-\frac{r^2}{a^2}}.$$

Здесь z — заряд ядра, a — параметр, определяемый из опыта. На рис. 3 эти распределения нарисованы для кислорода и углерода ($a \approx 1{,}65$ *ферми*). На рис. 4 дано распределение Ферми, подогнанное под результаты опытов с Li^6 ($c = 5{,}3$ *ферми*, $t = 0{,}7$ *ферми*).

Подчеркнем еще раз, что все эти данные очень грубы и только дальнейшие опыты (с использованием электронов больших энергий) позволят получить более детальные сведения о пространственной структуре ядер.

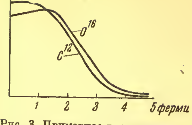


Рис. 3. Примерное распределение заряда в ядрах углерода и кислорода, определенное при помощи рассеяния электронов с энергией 420 *Мэв*. В этом случае экспериментальные результаты интерпретировались кривой:

$$\rho = \rho_0[1 + (z - 2)\, r^2/3a^2]\, e^{-r^2/a^2},$$

причем для углерода $a = 1{,}60$ *ферми*, а для кислорода $a = 1{,}72$ *ферми*. Форма кривой на малых расстояниях (уменьшение плотности для кислорода) связана с ранее выбранной формой кривой. Опыты можно описать и кривыми другого типа. Результатами опытов, строго говоря, определяется плотность только на расстояниях, не меньших 1 *ферми*

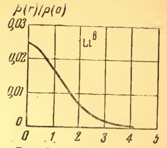


Рис. 4. Кривые распределения Ферми, подогнанные под результаты опытов с Li. Кривые выбраны в такой же форме, как и на рис. 2 для золота. Параметры этой кривой: $c = 5{,}3$ *ферми*, $t = 0{,}7$ *ферми*. По осям отложены те же величины, что и на рис. 2

В заключение отметим еще одно важное свойство ядра.

Предполагали, что ядро имеет шарообразную форму, которую можно описать одним параметром — радиусом. Такое мнение было общепринято, так как считалось, что нет никаких причин, которые могли бы изменить сферическую форму ядра. Возможно, что это представление возникло по аналогии с атомом.

Как хорошо известно, электроны удерживаются в атоме электрическим полем ядра. Так как размеры ядра во много раз меньше размеров атома, то ядро создает такое же поле, как и точечный заряд, помещенный в центре атома. Но поле точечного заряда сферически симметрично, поэтому и все свойства атома не должны зависеть от углов. В этом случае атом должен был иметь форму шарика. Совсем иначе обстоит дело в ядре. Исследования показали, что у некоторых ядер энергетический спектр похож на спектр вращающейся двухатомной молекулы. Он может быть хорошо описан, если предположить, что эти ядра имеют форму эллипсоида вращения, вытянутого вдоль своей большой оси.

Такими вытянутыми ядрами[4] оказались многие из ядер редких земель, у которых большая ось процентов на 20 больше малой. Подобную форму имеют ядра тяжелых элементов, находящихся в конце таблицы Менделеева,— уран, плутоний и др., но вытянутость у них несколько меньше. Вытянутыми оказались также и ядра некоторых легких элементов — алюминия и магния. Эти свойства ядер были открыты в 1952 г. Оге Бором и Маттельсоном. С тех пор их выводы были подтверждены в огромном числе работ.

Сведения о несферичности ядер были получены из данных о квадрупольных моментах и моментах инерции ядер. Экспериментальной основой явились для квадрупольных моментов сверхтонкая структура оптических спектров и данные радиоспектроскопии, а для моментов инерции — данные ядерной спектроскопии.

Вытянутость ядер, конечно, слабо проявлялась в опытах по рассеянию частиц ядрами, так как этот эффект невелик. Причина состоит в том, что ядро движется и вращается с большой скоростью в пространстве. Поэтому «с точки зрения» налетающей частицы ядро фактически оказывается сферическим, только его граница становится более размытой. Этот эффект также, по-видимому, замечен у некоторых ядер, однако точность опытов еще недостаточна, чтобы из них можно было бы делать убедительные заключения.

Возникает законный вопрос — не окажется ли ядро еще более сложной формой, чем сравнительно простой эллипсоид вращения. Предполагают, что ядро, может быть, имеет форму трехосного эллипсоида.

Спектры некоторых ядер дают основание полагать, что, возможно, некоторые из них грушевидной формы. Чтó в этих предположениях правильно, покажут дальнейшие опыты.

Следует, наконец, заметить, что заряды внутри ядра также не неподвижны. Правильнее сказать, что ядро представляет собой систему электрических токов, которые, в частности, создают и магнитный момент ядра. Распре-

---

[4] До сих пор ведется спор о том, бывают ли «сплюснутые» ядра, у которых ось симметрии является короткой осью эллипсоида. Пока не известно ни одно такое ядро. По-видимому, сейчас все согласны, что сплюснутых ядер нет.

деление токов также определяется из результатов опытов по рассеянию электронов ядрами. Однако все эти опыты пока еще также недостаточно точны, чтобы из них можно было извлечь сведения о деталях такого распределения.

Размеры нуклонов

Получив электроны большой энергии, физики сразу же попытались выяснить, каковы размеры протона.

С теоретической точки зрения всегда считалось, что протон окружен «облаком» из π-мезонов. Такое «облако» должно распространяться на расстояние порядка радиуса действия ядерных сил ($\sim 1{,}2$ *ферми*) и должно влиять на рассеяние электронов. Первые опыты, однако, показали, что вплоть до расстояния от центра протона, равного 1 *ферми*, поле еще остается кулоновским и существование облака не сказывается. Только более точные опыты Хофштадтера позволили обнаружить это «облако». Его радиус оказался равным 0,8 *ферми*[5]. Точность последних опытов Хофштадтера такова, что распределение заряда в «облаке» может быть прослежено примерно в интервале от 0,6 до 1,5 *ферми*. Различные модели, у которых распределения совпадают в этом интервале, дают результаты, согласующиеся с опытом. Это очень хорошо иллюстрирует рис. 5, на котором приведены три распределения, одинаково хорошо описывающие результаты опытов. На этом рисунке нанесены не кривые плотности $\rho(r)$, а заряд, заключенный в шаровом слое радиуса r единичной толщиной, т. е. величина

$$4\pi r^2 \rho(r).$$

Интересный результат дали измерения распределения заряда в облаке, окружающем нейтрон, который в целом электрически нейтрален. Нейтрон не был окружен, как протон, отрицательно заряженными π-мезонами, а результаты опытов согласовались с моделью, в которой заряд

---

[5] Под радиусом здесь принято подразумевать средний квадратичный радиус

$$r_{\text{ср. кв.}} = \left[\frac{1}{e}\int \rho(r) r^2 dv\right]^{1/2}$$

(e — заряд протона, dv — элемент объема).

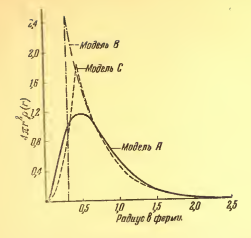


Рис. 5. Зависимости плотности заряда в π-мезонном облаке, окружающем протон, полученные при помощи рассеяния электронов с энергией 600 *Мэв*. Кривые хорошо показывают, что разные функции одинаково описывают результаты опыта, если они совпадают на «краю» протона; поэтому из опытов нельзя еще сделать заключение о распределении заряда в центральной части облака. На кривых для большей наглядности отложена не плотность на единицу объема ρ_0, а плотность на единицу длины — заряд сферического слоя $4\pi r^2\rho$

нейтрона распределен на расстояниях меньших, чем по крайней мере 0,3—0,4 *ферми*.

Это, однако, не означает, что нейтрон есть точечная частица. Напротив, его магнитное взаимодействие с налетающим электроном показывает, что токи, которые создают магнитный момент нейтрона, распределены в области тех же размеров, что и заряд у протона. Поэтому пока полагают, что внешняя часть π-мезонного облака у нейтрона электрически нейтральна (π^0-мезоны или π^+—π^- пары), но что в этой области существуют токи. Дальнейшие опыты должны дать очень интересные результаты.

Радиусы элементарных частиц

Естественно теперь спросить, является ли пространственная структура свойством только ядер и нуклонов или же все элементарные частицы имеют размеры? По-види-

мому, те частицы, которые физики называют сильно взаимодействующими — нуклоны, гипероны, π- и K-мезоны, окружены π-мезонными облаками и должны иметь размеры.

Недавно был обнаружен β-распад Λ^0-гиперона; $\Lambda^0 \to p + e^- + \nu$. Этот распад очень похож на β-распад нейтрона ($n \to p + e^- + \nu$) и должен идти по аналогичной схеме.

В распаде Λ^0, в отличие от распада нейтрона, электрон вылетает с очень большой энергией (вплоть до 213 *Мэв*). Длина волны такого электрона (около 1 *ферми*) уже близка к размерам нуклона, и мы можем ожидать отклонений от теоретического значения вероятности распада, рассчитанного для точечного Λ^0.

Действительно, полученная на опыте вероятность раз в 10—20 меньше теоретической. Какое это имеет отношение к радиусу Λ^0, пока не ясно. Надо ждать новых, более подробных опытов.

Совсем не решен вопрос о размерах слабо взаимодействующих частиц (лептонов): электрона, нейтрино и μ-мезона. Если размеры у них есть (а различные теоретические схемы, в частности Гейзенберга, к этому приводят), то в опыте должно наблюдаться нарушение законов электродинамики на малых расстояниях. До сих пор по этому вопросу почти ничего не известно. Справедливость электродинамики проверена сейчас лишь до расстояний порядка 1 *ферми*. Если у лептонов окажутся размеры, сравнимые с размерами нуклонов, то придется пересмотреть и все анализы опытов по рассеянию. Выяснение этого вопроса — самая увлекательная и самая главная задача современной физики элементарных частиц.

Интересную возможность обнаруживает теория β-распада. Ее глубокое отличие от электродинамики состоит в том, что сила взаимодействия в электродинамике описывается малой безразмерной постоянной $e^2/\hbar c = 1/137$, в то время как β-распад описывается размерной постоянной g, которая равна

$$g = 1{,}4 \cdot 10^{-49}\ \text{эрг} \cdot \text{см}^3 = 4{,}5 \cdot 10^{-32}\ \hbar c \cdot \text{см}^2.$$

Можно ожидать, что расстояния порядка $\sqrt{g/\hbar c} \approx$ $\approx 2 \cdot 10^{-16}$ *см* окажутся критическими для β-распада в том смысле, что на таких расстояниях β-взаимодействие станет сильным и мы столкнемся с областью, величина которой характеризует размеры лептонов. Вопрос лишь в том, не суще-



Рис. 6. Схема ядерных масштабов. Область расстояний, меньших 1 *ферми*, есть та новая область, в которую физики проникли в последние годы. На схеме показано несколько величин, которые были измерены до сих пор в этой области. Расстояния, меньшие 10^{-1} *ферми*, представляют еще и сейчас «белое пятно» в физике элементарных частиц. Внизу приводятся сравнительные размеры протона и ядер. У ядер показан также размер диффузионной границы

ствует ли каких-либо причин, по которым размеры лептонов были бы больше, чем 10^{-16} *см* (но меньше, чем 10^{-13} *см*). Кажется вполне вероятным, что в интервале 0,1—1,0 *ферми* и электрон начнет обнаруживать новые свойства и мы войдем в новую область, которая уже не описывается простыми законами теории точечного электрона.

Можно сказать, что физика ядра возникла тогда, когда исследователи проникли в области, имеющие размеры 10—1 *ферми* (опыт Резерфорда); вопросы структуры элементарных частиц проявляются в областях с размерами 1—0,1 *ферми* (рис. 6). Какие новые свойства вещества будут открыты, когда мы сумеем направить исследования в область 0,1—0,001 *ферми*, трудно даже представить. Спускаясь вниз по шкале расстояний, мы все время попадаем во все новые и новые миры, свойства которых неисчерпаемы. В то время как физики проникают в области малых длин, астрономы движутся в глубь вселенной на все бо́льшие и бо́льшие расстояния.

В наши дни астрономы при помощи новых электронных приборов приближаются к исследованию объектов на расстояниях, определяемых 10 млрд. световых лет

($\sim 10^{28}$ *см*). Интересно, что «скорости» исследований в обоих направлениях совсем разные. Человек проник в области примерно в 10^{16} раз меньшие своих масштабов (метры) и увидел миры, которые находятся на расстояниях, превышающих его размеры примерно в 10^{26} раз. Так что физики пока еще отстают от астрономов, и геометрическое среднее от обоих масштабов $(10^{28} : 10^{-14}) = 10^{21}$ *см* лежит на 1000 световых лет.

Однако и на достигнутых рубежах мы надеемся обнаружить много нового.

Примечание при корректуре. β-распады Λ^0- и Σ^--гиперонов происходят медленнее, чем это следовало бы из сравнения с распадом нейтрона. Такая задержка распада связана с радиусом гиперона, с тем, что при распаде $\Lambda \rightarrow \bar{e} + \bar{\nu} + p$ изменяется гиперзаряд тяжелой частицы (Λ имеет гиперзаряд, равный сумме странности и барионного заряда, а протон $+1$). Такие распады происходят медленнее, чем распады, при которых гиперзаряд не изменяется.

Новые представления об электроне*

Член-корреспондент Академии наук СССР

Д. И. Блохинцев

Когда изучаешь труд В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм», где подробно рассматривались в числе других важнейших философских проблем и вопросы методологии естествознания, то поражаешься, с какой глубиной и ясностью Ленин, не будучи физиком, разбирался в очень сложной ситуации, создавшейся тогда в физике и философии естествознания. Надо вспомнить, что этот период был для науки переломным, когда от механической физики ученые переходили к физике электромагнитной.

Развивая идеи диалектической теории познания, Ленин высказал замечательные мысли о неисчерпаемости электрона, в частности о том, что научное познание электрона может идти как угодно глубоко и будет приносить все новые и новые факты. Эта мысль базировалась на представлении, что всякая реальность является неисчерпаемой и наше знание только постепенно познает особенности этой реальности, все более углубляясь и расширяясь. Идея Ленина о неисчерпаемости электрона получила очень важное развитие, весьма разностороннее подтверждение и сейчас очень актуальна.

До последнего времени мы встречаемся с концепциями, согласно которым элементарные частицы представляют собой точечные объекты. Это, конечно, неправильно и идет вразрез с взглядом Ленина.

---

* «Природа», 1959, № 9.

В данной статье я хотел бы рассказать о том, как со времени Ленина развились наши представления об электроне и вообще об элементарной частице и как важно это развитие для нас, физиков.

Я не буду подробно излагать историю вопроса. Прежде всего напомним, что во времена Ленина физики представляли себе электрон, как заряженный шар. И хотя это очень элементарное представление, многие ученые считали, что оно полностью отображает ту реальность, которую мы называем электроном.

Однако какие бы ни развивались умозрительные теории, касающиеся электрона, уже в то время был выяснен масштаб, связанный с ним. Этот так называемый классический масштаб электрона определяется из следующего соотношения:

$$a_0 = \frac{e^2}{m_0 c^2} = 2{,}8 \cdot 10^{-13}\, см,$$

где e — заряд электрона, m_0 — его масса, c — скорость света. Такие масштабы физических объектов очень важны, они являются теми вехами, которые отделяют определенные области от других и обычно означают качественное изменение закономерности. Попытка развить теорию электрона как теорию заряженного шара очень быстро привела к противоречию с теорией относительности, и было выяснено, что на этом пути получить концепцию электрона невозможно. Правда, несколько позднее, в 30-х годах, Максу Борну удалось построить классическую теорию электрона, которая была довольно изящна и против которой трудно было что-либо возразить. Для этой теории характерен указанный выше масштаб — 10^{-13} *см*. Но нужно сказать, что теория Борна родилась слишком поздно, в это время уже были известны другие свойства электрона, которые нельзя было совместить с классическими концепциями и которые теория Борна не могла объяснить.

Таким образом, проблема структуры электрона во времена Ленина была сформулирована, но не была решена. Как мы увидим далее, она, в сущности говоря, не решена и до сих пор.

Развитие электронной теории пошло в дальнейшем главным образом по пути изучения движения электрона как целого. На этом пути в 20-х годах нашего столетия

развилась квантовая механика, которая позволила открыть новые качества электрона: волновые свойства, существование у него механического момента и т. д. Уже с точки зрения квантовой механики можно сказать, что электрон гораздо богаче, чем его представляли себе в начале развития электронной теории. Это подтверждает тезис Ленина о неисчерпаемости элементарных частиц.

В проблему структуры элементарных частиц квантовая механика прежде всего принесла новый масштаб — так называемую комптонову длину электрона. Комптонова длина электрона определяется квантовой постоянной $\hbar$ и составляет $l_0 = \frac{\hbar}{m_0 c} = 3{,}8 \cdot 10^{-11}$ *см*. Как видите, эта величина в сотню раз больше классического радиуса электрона. Таким образом, сразу стало ясно, что без учета квантовых эффектов вообще невозможно рассматривать какую-либо теорию структуры электрона, потому что квантовый масштаб оказался больше, чем классический. Проблема заключается в том, какая же из этих величин, классическая или квантовая, существенна для структуры электрона и определяет его масштаб? Естественно, возникли некоторые надежды, что квантовой механике удастся значительно продвинуться в этом направлении. Что же получилось на самом деле? Когда была применена квантовая теория, то оказалось, что масса электрона получалась бесконечной[1]. Таким образом, и квантовая техника, если так можно выразиться, оказалась недостаточной для понимания структуры электрона. Вероятно, законы внутреннего строения электрона еще более тонки, чем законы квантовой механики.

Несмотря на то, что квантовой теории не удалось разрешить проблему структуры электрона, все-таки на этом пути были достигнуты некоторые существенно новые результаты. Прежде всего, оказалось, что подсчет радиуса электрона по квантовой теории дал новый масштаб, назовем его «квантовым радиусом электрона»:

$$a_{\text{к}} = \frac{\hbar}{m_0 c} e^{-137} \approx 10^{-70} \, см,$$

где e — основание натуральных логарифмов.

[1] Бесконечной получается собственная энергия E, которая связана с массой соотношением $E = mc^2$.

Этот масштаб связан с комптоновой длиной, но умножается на исключительно малое число (e^{-137}). Благодаря этому радиус оказался равным 10^{-70} *см*. Такой малый радиус электрона, полученный из теории, сам по себе был поразительным фактом. М. А. Марковым было замечено, что этот радиус даже меньше гравитационного, т. е. той длины, которая определяет эффекты тяготения. Гравитационный радиус электрона

$$a_{\text{г}} = \frac{km_0}{c^2} \approx 10^{-55}\ см$$

(где k— гравитационная постоянная), т. е. он много больше квантового радиуса.

Поэтому многие физики стали думать (и эта мысль подмечена М. А. Марковым), что без гравитации вообще нельзя рассмотреть структуру электрона, потому что гравитационный радиус больше квантового.

Надо сказать, что физики, которые пытались привлечь к вопросу о структуре электрона теорию тяготения, не достигли успеха: проблема оказалась слишком сложной и слишком трудной. Сами длины, я бы сказал, подозрительно малы по сравнению с классическим и комптоновым радиусами.

Один из успехов, который, тем не менее, был достигнут в квантовой теории поля, заключался в том, что удалось вычислить некоторые новые эффекты. Оказалось, что электроны движутся в атомах не по плавным орбитам (я буду применять термин «орбита»), но на самом деле под влиянием нулевых колебаний электромагнитного поля совершают вблизи орбиты как бы нерегулярное броуновское движение. Кроме того, около электрона возникают пары позитронов и электронов, вакуум около электрона поляризуется.

Эти очень тонкие эффекты, предсказанные теорией, были затем обнаружены экспериментально, т. е. было показано, что возникают обусловленное этими явлениями расчленение и сдвиг уровней энергии атома водорода, которые и были обнаружены экспериментально.

Точность, достигнутая в этих измерениях, значительно превосходит «астрономическую».

Однако эти новые методы не позволили при решении вопроса о массе электрона освободиться от бесконечностей.

Если же массу электрона удавалось «сделать» конечной, то здесь заряд его обращался в нуль.

Видимо, правильный вывод заключается в том, что современная электродинамика вообще неприменима к таким масштабам, как длина $a_к$, которая оказывается существенной при последовательном развитии современной квантовой электродинамики.

Я хотел бы в связи с этим заметить, что существуют и другие процессы, которые мы обычно не привыкли принимать во внимание, но которыми нельзя пренебречь, а именно: известно, что электрон может превращаться в μ-мезон и в пару нейтрино $e \rightleftarrows \mu + \nu + \tilde{\nu}$, где e — электрон, μ — мезон, ν и $\tilde{\nu}$ — нейтрино и антинейтрино. Это так называемое «слабое» взаимодействие, радиус которого $l_Ф$ определяется выражением

$$l_Ф = \sqrt{g_Ф \hbar c} \approx 10^{-16} \ см,$$

где $g_Ф$ — константа Ферми, весьма малая величина, обладающая размерностью.

Нами было показано, что когда длина волны становится очень короткой, то это слабое взаимодействие становится сильным. Это значит, что нельзя не рассматривать процессы, которые являются неэлектромагнитными. Надо учитывать связь электромагнитных процессов с процессами появления μ-мезонов и нейтрино.

Таким образом, весь вопрос оказался более сложным, чем это представлялось раньше.

Как же сейчас вырисовывается картина электрона? Схематично она представлена на рис. 1. Такое изображение весьма условно, но другого способа нет. Данная схема построена на представлении о том, что центр электрона закреплен, в то время как на самом деле электрон претерпевает сильную отдачу и не может находиться в состоянии покоя.

Далее, мы считаем, что электрон имеет некоторую атмосферу. Он испускает и поглощает фотоны. Где-то в окрестности электрона появится пара позитрон—электрон. Этот масштаб будет масштабом комптоновой длины, т. е. 10^{-11} *см*. Затем следует область, где возникает пара π-мезонов, этот масштаб будет порядка 10^{-13} *см*, затем область появления пары нуклон — антинуклон (тяжелых частиц), этот масштаб будет порядка 10^{-14} *см*; затем будет область, где существенно слабое взаимодействие, порядка 10^{-16} *см*,

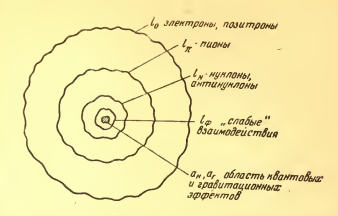


Рис. 1. Схема структуры электрона. Изображены оболочки виртуальных частиц. Характерные масштабы $l_0 \simeq 10^{-11}$ *см*, $l_\pi \simeq 10^{-13}$ *см*, $l_N \simeq 10^{-14}$ *см*, $l_\Phi \simeq 10^{-16}$ *см*, $a_r \simeq 10^{-54}$ *см*, $a_k \simeq 10^{-70}$ *см*

и где-то будет область, в которой, может быть, играют роль гравитационные, а далее и квантовые эффекты. Таким образом, размер электрона оказывается очень большим, первый квантовый размер 10^{-11} *см*. Но атмосфера эта очень разрежена. Она определяется весьма маленькой величиной — константой электромагнитного взаимодействия $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$. Однако эта атмосфера очень прозрачна, или «плотность» ее, если можно применить здесь такой термин, ничтожна.

Таковы выводы теории. Что же мы в ее подтверждение могли бы привести из эксперимента?

Пока можно говорить, что из явлений расщепления атома доказано существование дальней атмосферы. Ближнюю же атмосферу мы имеем основания предполагать, но в пользу ее существования пока нет еще никаких прямых доказательств: трудности экспериментальных исследований в области таких малых масштабов исключительно велики. К этому надо добавить, что каждый раз, когда электрон испускает μ-мезон и пару нейтрино—антинейтрино, он претерпевает отдачу, т. е. сильно отбрасывается. Поэтому до сих пор не удалось экспериментально измерить радиусы слабого взаимодействия.

Таким образом, электрон, видимо, можно рассматривать для многих целей как точку, слабо взаимодействующую со своей атмосферой. Так как атмосфера слаба, то в некотором приближении ею можно пренебречь, и тогда мы опять получаем концепцию точки. Поэтому электрон является прекрасным объектом не столько для исследования его самого, сколько для того, чтобы при его помощи изучать структуру других частиц. И действительно, использовав пучок электронов, удалось изучить структуру нуклонов.



Рис. 2. Схема структуры нуклона. Изображены оболочки виртуальных частиц. Характерные масштабы: $l_\pi \cong 10^{-13}$ *см*, $l_k \gtrsim 10^{-14}$ *см*, $l_N \cong 10^{-14}$ *см*

Попытаемся изобразить схему нуклона (рис. 2).

Мы получаем некоторую центральную область порядка 10^{-14} *см* (керн), где сосредоточены нуклоны и антинуклоны. Затем идет довольно близкая к ней оболочка, где сосредоточены K-мезоны. И, наконец, дальняя оболочка, где сосредоточены π-мезоны. Эта атмосфера π-мезонов будет иметь радиус порядка 10^{-13} *см*.

Как видно, эта схема довольно близка к схеме электрона, но разница в том, что взаимодействия, которые порождают атмосферу нуклона, определяются не постоянной тонкой структуры ($\alpha = {}^1/_{137}$), а другой постоянной g $\left(\text{или } \frac{g^2}{\hbar c}\right)$, которая определяет взаимодействие нуклонов и π-мезонов, и эта постоянная равна 15, т. е. она в две тысячи раз больше, чем постоянная тонкой структуры. Это значит, что атмосфера нуклона очень плотна.

Атмосферу нуклона удалось обнаружить экспериментально; с помощью электронов большой энергии были получены сведения о существовании такой π-мезонной атмосферы. В этом смысле можно сказать, что совершенно

ясно обнаружена структура нуклонов. Итак, нуклон имеет довольно сложное строение.

Надо сказать, что в изучении таких проблем, как структура нуклонов, двигаться вперед так же трудно, как в далекие области вселенной. Разница только та, что в астрофизике приходится пользоваться сложными телескопами, а в атомной физике — сложными ускорителями. Успешным шагом в этом направлении является то, что синхрофазотрон в Дубне сейчас позволяет работать в масштабе 10^{-14} *см*.

Хотелось бы еще подчеркнуть следующее. Как видно из изложенного, картина элементарных частиц получается очень сложной. Однако, исходя из методологии, которую нам оставил Ленин, можно утверждать, что в области малых масштабов мы встретимся с еще более интересными явлениями.

Приведем пример, который показывает, что может дать изучение областей малых масштабов, причем здесь нельзя обойтись без более или менее гипотетических предположений.

Представьте себе, что вы будете рассматривать взаимодействие (столкновение) двух быстрых нуклонов, скажем, двух протонов. При этом рождаются новые частицы — нуклоны, мезоны, т. е. возникает «ливень» или «звезда», как мы иногда говорим. Взаимодействие мы определяем сечением, т. е. элементарной площадкой, которую один нуклон «подставляет» другому.

Сейчас замечено, что для частиц с очень большими энергиями, начиная с энергии, которую мы имеем на ускорителях, и кончая максимальными энергиями космических лучей (они еще в 10^9 раз более мощны), это сечение остается постоянным, т. е. оно не убывает с энергией.

Теперь можно поставить такой вопрос: что будет с нуклонами при исключительно высоких, фантастических энергиях (можете себе представить, что протон разогнался на каких-то космических полях и достиг огромной энергии)? Тогда есть две возможности: либо сечение будет падать с энергией, либо останется неизменным.

В первом случае мы получаем то, что вытекает из современных теорий: взаимодействие убывает, и если оно при весьма больших энергиях частиц обратится в нуль, то это значит, что частицы становятся свободными. Тогда частица, которая имеет огромную энергию (это будет ее

«личным делом»), не сможет эту энергию передать другим частицам.

Представим, однако, другой случай: с увеличением энергии площадь сечения не уменьшается, Это мы наблюдаем при сравнении частиц, ускоренных искусственно, с частицами космических лучей). Тогда при столкновении таких исключительно энергичных нуклонов будут рождаться макроскопические тела. Энергия этих частиц будет достаточной для образования колоссального количества элементарных частиц. Если немножко пофантазировать, то легко себе представить, что в результате таких столкновений нуклонов может родиться звезда — не в лабораторном смысле, а в таком, как ее понимают астрономы. И тогда можно сказать, что возникнет прямой переход явлений микроскопических в явления макроскопические.

Совершенно ясно, сколь сложной и глубокой должна быть теория, чтобы она могла описать явления и возможности, которые на самом деле могут заключаться в микромире.

Если здесь будут возникать нуклоны и антинуклоны и разлет их будет не симметричен, то в одну сторону полетит больше нуклонов, а в другую — антинуклонов, и каждый из них будет продолжать расщепляться: нуклоны будут догорать в «мире», а антинуклоны — в «антимире».

Я позволил себе привести пример, который показывает, что значат маленькие масштабы и что в них может содержаться. Это доказывает на совершенно конкретном физическом примере, какой реальный вес имеют слова Ленина о неисчерпаемости электрона или, мы сказали бы теперь, о неисчерпаемости элементарных частиц.

Следует напомнить, — и Ленин это часто подчеркивал, — что вопрос о нашем знании или незнании — это вопрос практики; знание есть превращение вещи в себе в вещь для нас. Если рассмотрим сегодняшнюю ситуацию в физике, то можем сказать, что атом, и отчасти атомное ядро, в значительной степени превратился из вещи в себе в вещь для нас. Сейчас мы присутствуем при том, когда с элементарными частицами происходят эти же процессы.

Обнаружение антипротона*

Член-корреспондент Академии наук СССР
В. И. Гольданский

Когда в мае 1956 г. на трибуну проходившей в Москве Международной конференции по физике частиц высоких энергий поднялся для рассказа об антипротоне Эмилио Сегре, зал встретил его дружной, долго несмолкавшей овацией. Позднее один из американских участников конференции не без удивления вспоминал об этом в своем «русском дневнике». Но что же тут удивительного? Наши ученые, гордые великими достижениями советской науки, искренне радуются и успехам своих зарубежных друзей, горячо приветствуя всякую новую победу человеческого разума. Дружные аплодисменты советских физиков были проявлением этого чувства по отношению к Эмилио Сегре, его ученику — Оуэну Чемберлену, присутствовавшему в том же зале в Москве, и их сотрудникам, обнаружившим антипротон. 26 октября 1959 г. за это замечательное исследование Э. Сегре и О. Чемберлену была присуждена Нобелевская премия по физике.

Дирак предсказывает существование античастиц

Остроумные эксперименты обнаружения антипротона Сегре и Чемберлен начали готовить еще до запуска бэватрона — протонного синхрофазотрона на энергию частиц в 6,3 млрд. *эв*. Спустя примерно полтора года после нача-

* «Природа», 1960, № 4.

ла работы ускорителя, в октябре 1955 г., дотоле «неуловимый» антипротон был наконец найден.

Однако история обнаружения антипротона началась не осенью 1955 г., а гораздо раньше, в 1928 г., и не в лаборатории, а за письменным столом теоретика.

Английский ученый П. А. М. Дирак впервые объединил представления квантовой механики и теории относительности и вывел уравнение, получившее его имя. В этом уравнении нашел свое место собственный вращательный момент (спин) электрона и были правильно описаны его свойства. Но одновременно теория Дирака привела к неожиданному выводу: электрон может, кроме обычных состояний, находиться также и в состояниях с отрицательной энергией. Этот вывод получил блестящее подтверждение в 1932 г., когда в космических лучах был открыт «антипод» электрона — позитрон. За исключением знака электрического заряда, электрон и позитрон — частица и античастица — во всем одинаковы [1]. Но и различие знаков заряда не обязательно для частиц и античастиц. Сегодня мы уже знаем примеры электронейтральных пар: частица — античастица. Что же является главным, определяющим свойством? То, что частица и античастица могут рождаться или взаимно уничтожаться без какого бы то ни было преобразования других участвующих во взаимодействии частиц. Возможно, в частности, рождение или взаимное уничтожение частицы и античастицы в процессах, в которых, кроме самой «пары», участвуют только гамма-кванты. Под действием гамма-кванта может, например, родиться пара позитрон—электрон, и наоборот, эта пара может превращаться в два (реже в три или один) гамма-кванта. При этом энергия гамма-квантов должна численно равняться сумме масс частицы и античастицы, умноженной на квадрат скорости света.

Масса покоя электрона и позитрона соответствует довольно малой энергии — всего 0,5 млн. электронвольт (*Мэв*). Поэтому рождение пар позитрон — электрон оказалось возможным уже под действием испускаемых радиоактивными препаратами гамма-квантов с энергией в не-

[1] Мы оставляем здесь в стороне различие знаков их поляризации при β-распаде и других слабых взаимодействиях.

сколько *Мэв*. Этот процесс, как и обратный ему, подробно исследовался физиками во многих странах.

Рождение пары частица—античастица может происходить не только за счет энергии гамма-кванта, но и за счет кинетической энергии любой другой частицы, если только эта энергия достаточно высока.

Поиски антипротона

Шли годы, даже десятилетия, а электрон и позитрон оставались единственным известным примером «пары»: частица—античастица. Между тем, протон тоже описывается уравнением Дирака, и существование антипротона казалось поэтому совершенно естественным. Правда, протон в тысячи раз тяжелее электрона, и потому для рождения пары протон—антипротон нужны энергии уже в несколько миллиардов электронвольт (*Бэв*). Но в космических лучах есть частицы с гораздо большей энергией. После позитрона эти лучи принесли в дар исследователям μ-мезоны, а затем и π-мезоны, но антипротоны так и не обнаруживались.

Возникло положение, о котором метко писал несколько лет тому назад в своей статье об античастицах академик Я. Б. Зельдович: «Интервал времени между предсказанием антипротона и его наблюдением в 1955 г. был слишком велик, и у некоторых теоретиков нервы не выдерживали — в последние годы появились попытки построить теорию без антипротона»[2].

Нет смысла даже вскользь останавливаться сейчас на этих попытках. Скажем лишь, что некоторые из них строились на том, что протон «не совсем» дираковская частица — в силу внутренней сложности протона его магнитный момент почти втрое больше, чем следует из уравнения Дирака. Теперь, после того как антипротоны не только открыты, но и детально изучены, можно ответить и на вопрос: почему же их не удавалось заметить в космических лучах? Дело в том, что вероятность рождения антипротона даже при высоких энергиях оказалась довольно малой — гораздо меньше вероятности рождения целого «коллектива» мезонов. К тому же при рождении на сложном ядре антипротон с большой вероятностью тут же

[2] См. «Успехи физических наук», т. LIX, 1956, вып. 3, стр. 381.

поглощается и уничтожается, оставаясь, таким образом, незамеченным. Поэтому, хотя в каждом из ядер элементов, составляющих атмосферу, содержится, в среднем, по 15 протонов и нейтронов, количество антипротонов, рождающихся при бомбардировке этих ядер, оказывается не выше, чем при использовании в качестве мишени водорода, и антипротоны еще сильнее «тонут» в массе мезонов. Поток же способных порождать антипротоны частиц, приходящих в атмосферу в первичном космическом излучении, по крайней мере в десятки миллиардов раз меньше, чем на ускорителях.

До пуска бэватрона ускорители вовсе не могли конкурировать в поисках антипротона с космическим излучением — им для этого не хватало энергии. Лишь бэватрон оказался первым ускорителем, на котором энергия протонов превзошла так называемый «порог» рождения антипротонов, и было ясно, что именно на этом ускорителе начнется решающий этап охоты за новой частицей.

Антипротон обнаружен

Обнаружение антипротона осенью 1955 г. отнюдь не явилось сюрпризом. Было более или менее ясно, что само создание бэватрона уже служит залогом успеха поисков антипротона, и задача физиков лишь хорошо осмыслить проведение опыта. Действительно, обнаружение антипротона нельзя назвать неожиданным открытием в том же смысле слова, как, например, открытие рентгеновых лучей или радиоактивности. Но это отнюдь не умаляет заслуг Сегре и Чемберлена, продемонстрировавших высокий уровень изобретательности и экспериментального мастерства.

Целью их опытов на бэватроне было найти частицу с массой, равной массе протона, и отрицательным электрическим зарядом. При бомбардировке протонами с энергией в миллиарды электронвольт мишени, вдвинутой внутрь камеры ускорителя, испускаются всевозможные частицы: положительные, отрицательные и нейтральные; устойчивые и живущие десятимиллиардные доли секунды; легкие (во много раз легче протона) и «тяжелые»; быстрые (со скоростью почти равной скорости света в вакууме) и «медленные», пробегающие всего тысячи километров в секунду. Как же выделить антипротоны на этом пестром фоне?

Вспомним картину поведения радиоактивного излучения в магнитном поле — в одну сторону отклоняются положительные α-частицы, в другую — отрицательные β-частицы, прямо летят нейтральные γ-лучи. Так и в магнитном поле самого бэватрона и дополнительного магнита (*M1*) с фокусирующим устройством (*Q1*) (рис. 1) отрицательные частицы поворачивались в сторону, противоположную пучку протонов, и выводились за защитную стену. Через канал в этой стене — и далее сквозь сцинтилляционный счетчик *S1* магнитное поле направляло лишь отрицательные частицы и притом обладающие определенным импульсом. Но импульс есть произведение массы на скорость, а потому одинаковым импульсом могут обладать более быстрые легкие и более медленные тяжелые частицы, и наряду с антипротонами в счетчик *S1* попадали и более легкие отрицательные π-мезоны, которых приходилось около пятидесяти тысяч на каждый антипротон.

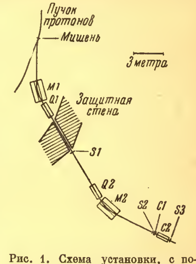


Рис. 1. Схема установки, с помощью которой был впервые зарегистрирован антипротон

Как же выделить эти единичные антипротоны в «толпе» других отрицательных частиц? Ответ напрашивается сам собой — по скорости их движения. Простейший способ определить скорость движения состоит в том, чтобы установить на пути движущейся частицы два наблюдательных поста и измерить время ее прохождения между наблюдателями. Это и было сделано. Скорость выделяемых магнитным полем π-мезонов составляла около 99% скорости света в вакууме — на 23% больше, чем скорость проходивших через *S1* антипротонов. Магнит *M2* (с фокусирующим устройством *Q2*) вновь поворачивал антипротоны и π-мезоны к счетчикам *S2* и *S3*. Проходя через три сцинтилляционных счетчика, частицы вызывали там вспышки света и сдвиг этих вспышек во времени друг относитель-

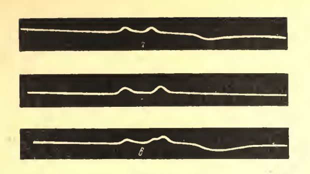


Рис. 2. Осциллограммы, показывающие (сверху вниз) импульсы счетчиков *S1*, *S2*, *C1*. Осциллограмма *а* характеризует импульсы, обусловленные мезоном, проходящим через систему; *б* — импульсы, возникающие от антипротона (отсутствие импульса в счетчике *C1*); развертка *в* регистрирует не антипротон (хотя расстояние между *S1* и *S2* «антипротонное»), а случайное совпадение двух π-мезонов (наряду с импульсами от *S1* и *S2* имеется также и импульс от *C1*)

но друга отмечался на осциллограммах. Длина пути от первого «наблюдателя» до второго равнялась 12 *м*, антипротоны пробегали этот путь за 51 миллимикросекунду (*ммксек*), а более быстрые π-мезоны всего за 40 *ммксек*. Таким образом, вдобавок к выделению всех отрицательных частиц с определенным импульсом эти частицы еще разделялись по скорости, значит, и по массе. Казалось бы, все условия для регистрации антипротонов выполнены и каждый случай тройной вспышки в *S1*, *S2*, *S3*, в котором счетчик *S2* зажегся на 51 *ммксек* позже, чем *S1*, есть след антипротона. Но дело обстоит сложнее. Ведь в проходящем через счетчики пучке отрицательных частиц в десятки тысяч раз больше π-мезонов, нежели антипротонов, и потому весьма велика вероятность случайного совпадения импульсов от двух π-мезонов, которые можно спутать с антипротоном. Чтобы избавиться от подобных случайных совпадений, Сегре и Чемберлен ввели в установку еще два счетчика — *C1* и *C2*. Но это уже другого рода счетчики: они регистрируют не просто пролет части-

цы, а испускаемое при этом пролете черенковское свечение. Как известно, черенковское свечение испускается лишь такими частицами, которые движутся в веществе быстрее света, т. е. со скоростью v, большей, чем $\frac{c}{n}$, где c — скорость света в вакууме (300 000 *км/сек*), а n — показатель преломления. Угол, под которым испускается это свечение, также зависит от скорости частицы. Поэтому черенковские счетчики могут производить отбор частиц по их скорости. Первый черенковский счетчик *C1* давал свет лишь от таких частиц, скорость которых превышала 79% от скорости света в вакууме; второй счетчик был устроен несколько сложнее и отбирал лишь те частицы, для которых отношение $\frac{v}{c}$ находилось в пределах 75—78%.

Поэтому π-мезоны давали импульс в *C1* и не давали в *C2*, антипротоны же, наоборот, давали импульс в *C2*, но не в *C1* (рис. 2). Так эффект Черенкова—Вавилова—открытие советских физиков, удостоенное Нобелевской премии 1958 г.,— сыграл важнейшую роль в работе Сегре и Чемберлена [3].

Вскоре после описанных первых доказательств существования отрицательной частицы с массой протона (в первых опытах наблюдалось около сорока таких частиц) были получены дополнительные подтверждения того, что на бэватроне действительно обнаружен антипротон.

Речь идет о совместной работе группы ученых в лабораториях Беркли (в том числе Сегре и Чемберлена) и Рима, изучавших следы от взаимодействия новооткрытых частиц с ядрами облученных в Беркли фотоэмульсий. На рис. 3 показана первая фотография антипротона, на которой ясно видно, что после остановки этой частицы (след L^-) происходит своеобразный «взрыв» с передачей большой энергии множеству частиц.

Эта энергия выделилась в процессе «уничтожения» (аннигиляции) антипротона при столкновении его с протоном.

---

[3] За открытие и изучение эффекта Вавилова—Черенкова Нобелевской премии были удостоены П. А. Черенков, И. Е. Тамм и И. М. Франк.— *Прим. ред.*



Рис. 3. Первая фотография «звезды», образовавшейся при «уничтожеиии» (аннигиляции) антипротона. След аитипротоиа (L^-) стаиовится все более жирным по мере замедлеиия антипротоиа. В результате его аннигиляции с протоиом ядра фотоэмульсии образовались π-мезоны (a, b), быстрый протои (c) и медленные протоны, или α-частицы (следы d, e, f, g, h, i)

Другие античастицы

Вскоре за обнаружением антипротона последовало наблюдение на бэватроне в Беркли также и антинейтрона. Эта частица была выделена как продукт так называемой «перезарядки» антипротона, превращения пары протон — антипротон в пару нейтрон—антинейтрон: $p + \widetilde{p} = n + \widetilde{n}$. Таким образом, обнаружение антинейтрона явилось прямым следствием работы Сегре и Чемберлена с сотрудниками. В последующие за первым наблюдением антипротона годы Сегре и Чемберлен осуществили систематические исследования его взаимодействий с нуклонами и атомными ядрами. Наиболее интересным фактом, установленным в этих исследованиях, являются большие вероятности всех ядерных процессов с участием антипротонов, значительно превышающие вероятности аналогичных процессов для нуклонов, т. е. протонов и нейтронов. Объяснение этого факта может быть связано со все более общепринятым рассмотрением нуклонов как сложных образований из непроницаемой сердцевины и окружающего ее π-мезонного облака. По отношению к антипротонам и антинейтронам нуклонная сердцевина оказывается уже не непроницаемой, а наоборот, энергично поглощающей, и это сильно повышает вероятность взаимодействия. Энергия, выделяющаяся при взаимном «уничтожении» (аннигиляции) антипротона с протоном или нейтроном, столь велика, что за счет этой энергии могут образовываться самые различные частицы. Масса и энергия этих частиц могут быть тем больше, чем выше начальная кинетическая энергия системы протон—антипротон. Открытие антипротона позволило широко исследовать процессы аннигиляции.

Подробно изучались различные характеристики аннигиляции антипротонов в водороде, дейтерии и сложных ядрах. Оказалось, что при аннигиляции останавливающегося антипротона с протоном в среднем образуется почти 5 π-мезонов — поровну положительных, отрицательных и нейтральных.

Подробные исследования энергетического распределения аннигиляционных π-мезонов, выполненные с помощью огромной жидководородной пузырьковой камеры, привели к открытию в 1961 г. новых интересных фак-

тов о взаимодействии π-мезонов друг с другом. Не исключено, что эти новые факты объясняются существованием ранее неизвестного тяжелого мезона, обладающего чрезвычайно малым временем жизни и распадающегося на три π-мезона [4].

Примерно в 3% случаев при аннигиляции антипротонов испускаются тяжелые (K) мезоны. Эти данные интересны тем, что позволяют различить два обсуждавшихся, как возможные, значения спина K-мезона — 0 и 1 и сделать выбор в пользу нуля. Были обнаружены и такие случаи, когда при взаимодействии протонов с антипротонами образуются пары гиперон—антигиперон (неустойчивые частицы, более тяжелые, чем нуклоны и распадающиеся на нуклоны и π-мезоны).

В последние годы опыты по исследованию свойств антипротонов проводятся и в лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований в Дубне, где получен ряд существенных результатов.

Изучение свойств антипротонов уже вышло за рамки только физики элементарных частиц. Гораздо более общее значение имеет, например, вопрос, подвержены ли античастицы обычным гравитационным силам или для них существует «антигравитация», приводящая к тому, что в поле земного тяготения такие частицы «падали» бы не вниз, а вверх.

Исходя из теории тяготения Эйнштейна, можно, правда, уверенно утверждать, что гравитационное поведение частиц и античастиц одинаково, но ряд физиков стремится произвести прямую экспериментальную проверку этого утверждения.

В принципе возможно существование целых «антимиров», в которых «антиатомы» состоят из антипротонов и антинейтронов в ядре и позитронных оболочек. При встрече вещества и «антивещества» должна происходить аннигиляция, сопровождающаяся мощным излучением — в том числе и радиоизлучением.

В последнее время производились оценки возможного вклада процессов аннигиляции в наблюдаемое на Земле радиоизлучение, приходящее из нашей и дру-

[4] За последнее время обнаружено большое число короткоживущих «резонансных» многомезонных систем, распадающихся с испусканием нескольких мезонов или γ-квантов.— *Прим. ред.*

гих галактик. Расчеты показали, что «примесь» антиатомов в источниках радиоизлучения не превышает десятимиллионной доли. Не исключено, однако, что в будущем обнаружится более заметная роль антивещества в каких-либо астрофизических процессах.

В этой связи большой интерес сулит предстоящее развитие «нейтринной астрономии», которая будет черпать сведения о различных процессах в мироздании на основании наблюдений приходящих на Землю из космоса нейтрино и антинейтрино.

Изучение ядра*

Доктор физико-математических наук
А. И. Базь,

кандидат физико-математических наук
Л. Д. Пузиков

Темпы развития ядерной физики в настоящее время таковы, что экспериментальные и теоретические работы, выполняемые в течение года в различных лабораториях мира, исчисляются тысячами, если не десятками тысяч. Большая часть этих трудов публикуется в научных журналах, а о наиболее интересных и важных из них, кроме того, сообщается на различных конференциях. Поэтому наиболее простой способ осветить основные достижения физики атомного ядра — это рассказать о том, что говорилось на состоявшихся летом и осенью 1960 г. двух основных ядерных конференциях. Мы имеем в виду Всесоюзную конференцию по ядерным реакциям при малых и средних энергиях (Москва, 21—28 июля 1960 г.) и Международную конференцию по структуре ядер (Канада, 29 августа — 3 сентября 1960 г.). В работе этих конференций приняло участие более тысячи ученых из различных стран мира, было представлено около 400 докладов.

Оболочечная модель ядра

При попытке понять и объяснить свойства атомных ядер физики сталкиваются с двумя основными трудностями: во-первых, ядра — это сложные системы, состоя-

* «Природа», 1961, № 8.

щие из большого числа (иногда более 250) нуклонов, т. е. нейтронов и протонов, и для того, чтобы рассчитать свойства такой системы, необходимо решить задачу о движении всех этих взаимодействующих нуклонов. Эта задача очень трудна математически, и даже всего лишь для трех нуклонов никому пока не удалось получить ее точное решение. Во-вторых, до сих пор точно неизвестно взаимодействие между нуклонами в ядре.

Все это приводит к тому, что для описания той или иной группы явлений ядерной физики приходится прибегать к моделям, т. е. к приближенным, упрощенным представлениям о ядре или механизме ядерных реакций.

Многие свойства ядер (особенно легких и средних) удовлетворительно объясняются оболочечной моделью, согласно которой нуклоны в ядре движутся почти независимо друг от друга по определенным орбитам в некотором поле, которое определяется совокупным действием всех частиц, входящих в ядро, и носит название самосогласованного поля. Иными словами, предполагается, что каждый нуклон в ядре обладает определенной энергией и обмена энергиями между нуклонами почти не происходит. Такая модель позволяет во многих случаях предсказать спины и четности основных и слабовозбужденных состояний ядер, энергии возбуждения, магнитные и квадрупольные[1] моменты и т. д. В последнее время оболочечная модель одержала две новые победы, о которых говорилось на конференциях. При бомбардировке ядер высокоэнергичными протонами падающий нуклон может, проходя сквозь ядро, выбить из него еще один протон. При этом затрачивается некоторая энергия, необходимая для вырывания протона из ядра. В результате измерения энергии вырывания была получена картина, прекрасно согласующаяся с той, которую можно было ожидать, исходя из оболочечной модели. Оказалось, что нуклоны в ядре находятся в состояниях с довольно хорошо определенной

---

[1] Квадрупольный момент — одна из основных характеристик ядра. Квадруполем называется система зарядов, создающая такое же поле, как четыре одинаковых по величине заряда (два положительных и два отрицательных), помещенных в углах квадрата, причем положительные находятся на одной диагонали, а отрицательные на другой. В частности, квадруполем является равномерно заряженный эллипсоид. Квадрупольный момент равен произведению площади квадрата на заряд.

энергией, т. е. они действительно движутся по определенным орбитам в некоем самосогласованном поле. Дальнейшее продолжение этих опытов, особенно измерение угловых распределений налетающего и выбитого протонов, повидимому, позволит получить более подробные сведения о движении нуклонов в ядре и, хотелось бы надеяться, даст еще более убедительные доказательства справедливости оболочечной модели.

Вторым достижением оболочечной модели было объяснение так называемого гигантского резонанса в фотоядерных реакциях, т. е. реакциях, происходящих при бомбардировке ядра γ-квантами. Из опыта известно, что вероятность взаимодействия γ-квантов с ядрами имеет довольно узкий максимум при энергиях γ-квантов 15—25 *Мэв* (в зависимости от атомного веса ядра А). Как было независимо показано двумя группами ученых, оболочечная модель предсказывает именно такое поведение вероятности.

Хотя в общем оболочечная модель дает хорошее согласие с экспериментом, нельзя забывать о том, что она построена на грубых упрощениях и поэтому может претендовать на описание лишь некоторых статических свойств ядер, т. е. тех свойств, которые проявляются во взаимодействиях, оставляющих ядро неизменным или почти неизменным. Основные теоретические трудности, с которыми сталкивается оболочечная модель, — это, во-первых, выяснение величины и характера так называемого остаточного взаимодействия между нуклонами, движущимися в самосогласованном поле ядра, и, во-вторых, учет явлений, происходящих на поверхности ядра. Вблизи поверхности плотность нуклонов и величина самосогласованного поля быстро уменьшаются и становится все более важным взаимодействие между отдельными нуклонами. Это должно приводить к образованию нуклонных группировок на поверхности ядра; в настоящее время появился ряд экспериментальных данных, подтверждающих это заключение.

Надлежащий учет поверхностных эффектов, по-видимому, позволит сильно расширить границы применимости оболочечной модели для описания свойств ядер.

Форма ядра

Пять лет назад считалось, что все ядра обладают сферической формой. Затем было найдено, что ряд экспериментальных данных противоречит такому заключению. Анализ этих данных показал, что многие ядра имеют не сферическую форму, а форму эллипсоида вращения. Эта гипотеза позволила объяснить последовательность и разность энергий слабовозбужденных уровней многих ядер, а также большие величины квадрупольных моментов основных состояний этих ядер (напомним, что квадрупольный момент сферически симметрично распределенного заряда равен нулю). Но в течение последних лет появился ряд экспериментальных данных, показывающих, что эта гипотеза не всегда хорошо согласуется с опытом.

Новые экспериментальные данные приводят к заключению о многообразии форм ядер: существуют не только сферические и эллипсоидальные состояния ядер, но и состояния другой формы. Например, одним из наиболее ин-

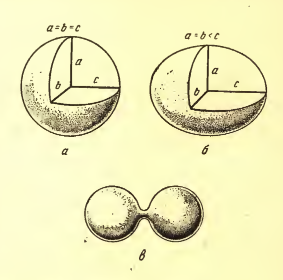


Рис. 1. Формы различных состояний ядер

а — сферическое ядро; *б* — ядро формы эллипсоида вращения; *в* — вид некоторых «гантельных» состояний ядра Mg^{24}

тересных открытий явилось открытие у ядра Mg^{24} весьма специфических возбужденных состояний, которые можно себе представить как два ядра C^{12}, вращающиеся одно относительно другого (гантель, составленная из двух ядер C^{12}) (рис. 1). Этот пример наводит на мысль о существовании ядерных состояний и с другой формой. Дальнейшая работа в этом направлении представляется очень интересной. При этом необходимо подчеркнуть, что существование «гантельных» состояний у Mg^{24} смогли обнаружить только благодаря новой экспериментальной технике, использующей в качестве бомбардирующих частиц ускоренные пучки тяжелых ионов.

Взаимодействие нейтронов и протонов с ядрами

В послевоенные годы было проведено очень широкое исследование процессов взаимодействия нейтронов и протонов средних и малых энергий (1—20 *Мэв*) с ядрами. Основные характеристики такого взаимодействия—полная вероятность взаимодействия и вероятность упругого рассеяния падающих частиц, а также угловое распределение рассеянных нуклонов. Оказалось, что экспериментальные значения этих величин прекрасно согласуются с результатами так называемой оптической модели ядра.

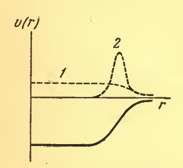


Рис. 2. Форма «оптического потенциала», описывающего взаимодействие нуклона с ядром. Мнимая часть потенциала (пунктир) пропорциональна вероятности того, что падающий нуклон поглотится (произведя ядерную реакцию) в данной точке ядра. Выбор между кривыми *1* и *2* пока еще не сделан

Согласно этой модели (рис. 2), взаимодействие нуклонов с ядром описывается как прохождение нуклонов через сгусток некоего «ядерного вещества». В качестве параметров, характеризующих взаимодействие, выбираются обычно «плотность» вещества, «коэффициент преломления» и какие-нибудь величины, определяющие распределение вещества по сгустку. Сравнение теории с опытом позво-

лило установить параметры этой модели. С течением времени становилось, однако, все более ясно, и это неоднократно подчеркивалось на конференциях, что «оптическая модель» в ее современной форме не может помочь выяснить целый ряд более тонких деталей взаимодействия.

Таким образом, опыты, проведенные в последнее время, с одной стороны, позволили уточнить параметры оптической модели, а с другой—ясно показали ограниченность самой модели. Основные проблемы, над которыми в настоящее время работают физики, это, во-первых, дальнейшее уточнение параметров модели (например, очень мало известно о радиальной зависимости коэффициента поглощения) для того, чтобы получить лучшее соответствие теории с опытом в тех случаях, когда оптическая модель применима, и, во-вторых, усовершенствование самой модели с тем, чтобы расширить границы ее применимости.

«Прямые» ядерные реакции

В 1936 г. появилась классическая работа Н. Бора о «промежуточном ядре» в ядерных реакциях. Когда нуклон или какая-нибудь другая частица падает на ядро, то она «запутывается» в ядре и, претерпев большое число соударений с нуклонами ядра, распределяет между ними свою энергию. На долю каждого отдельного нуклона при этом достается сравнительно немного энергии, так что ни один из них не может вылететь из ядра. Только за сравнительно большой промежуток времени (по сравнению с характерным ядерным временем 10^{-21} сек.), когда вся или большая часть избыточной энергии ядра случайно сосредоточится на одном нуклоне (или на группе нуклонов типа α-частицы), этот нуклон (или группа) получает возможность покинуть ядро и унести с собой избыточную энергию. При таком механизме, впервые предложенном Н. Бором, предполагается, что между попаданием нуклона в ядро и испусканием продуктов реакции проходит довольно много времени. Таким образом, всю реакцию можно разделить на три этапа: захват ядром падающей частицы, затем довольно длительное существование «промежуточного ядра» и, наконец, его развал (рис. 3). О таких реакциях говорят, что они идут через «промежуточное ядро».

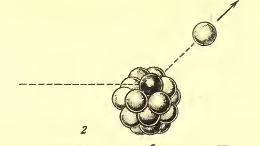


Рис. 3. Три стадии реакции, согласно концепции промежуточного ядра

1 — стадия столкновения; *2* — стадия, в которой промежуточное ядро живет время *T*; *3* — стадия развала промежуточного ядра

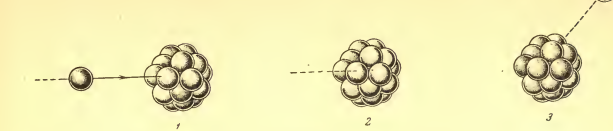


Рис. 4. Прямой механизм ядерной реакции. Падающий нуклон выбивает нуклон ядра (*1*) и садится на его место (*2*)

Длительность реакции определяется временем жизни промежуточного ядра и может достигать — в ядерном масштабе — огромных величин, порядка 10^{-12} сек. Однако в последние годы были изучены многочисленные реакции, не попадающие под схему Бора и протекающие гораздо быстрее. Например, протон, или α-частица, или какая-нибудь другая частица высокой энергии (30—40 *Мэв*), попадая в ядро или пролетая рядом с ним, может возбудить одно из возможных коллективных движений в ядре, отдать ему часть своей кинетической энергии и, практически не замедляясь, улететь от ядра (рис. 4). Реакция проходит за одну стадию и длится лишь столько времени, сколько нужно, чтобы пролететь вблизи ядра (10^{-21} сек.). Другим примером может служить реакция срыва, когда ядро выхватывает из пролетающей около него сложной частицы (α и т. д.) один или несколько нуклонов. Такой процесс также проходит очень быстро. Было предложено несколько грубых теоретических моделей для описания «прямых реакций» и при их помощи удалось объяснить многие экспериментальные данные. Гораздо лучшее согласие с опытом дает хотя и более сложный, но более полно описывающий происходящие физические процессы «метод искаженных волн». В этом методе учитывается не только взаимодействие в момент прямого контакта частицы с ядром, которое приводит к реакции (к возбуждению ядра или к захвату нуклона), но также взаимодействие ядра с падающими и разлетающимися частицами, влияющее на вероятность контакта и характер разлета. Этот метод, по-видимому, в ближайшие годы будет интенсивно применяться в расчетах ядерных реакций.

Прежде чем закончить этот весьма краткий обзор, куда не вошли многие чрезвычайно интересные и перспективные проблемы (например, круг проблем, связанных с эффектом Моссбауэра), нам хочется в нескольких словах резюмировать общее впечатление о положении в ядерной физике, сложившееся в результате анализа итогов прошедших конференций. Различные аспекты ядерных процессов отражаются различными, на первый взгляд, противоречивыми ядерными моделями. Сейчас в ядерной физике осуществляется интенсивный синтез всех этих моделей, перебрасываются мосты между оболочечной, оптической и моделью деформированных ядер. В теории ядерных реакций связываются воедино концепции промежуточного ядра, прямых процессов и оптического взаимодействия.

О математических методах квантовой теории поля*

Доктор физико-математических наук
Ю. В. Новожилов

Из всех областей физики наибольшее развитие за последние 20—30 лет получила физика элементарных частиц. Каждое открытие здесь имеет принципиальное значение. Эта область физики — передний край фронта физической науки. Исследуя реакции, происходящие с элементарными частицами, можно с наибольшей доступной нам сейчас полнотой убедиться в справедливости одних фундаментальных законов природы, например таких, как законы сохранения энергии, импульса, заряда и др., и в ограниченной применимости других (например, закон сохранения четности), а также встретиться с новыми законами сохранения — такими, как законы сохранения барионов и лептонов. И если в ближайшем будущем в физике будет сделано открытие, существенно изменяющее наши представления о природе мира, то оно безусловно будет связано с элементарными частицами. Неослабевающий интерес к физике элементарных частиц вызван, кроме того, и надеждами на будущие блага для человечества: ведь до сих пор изучение строения вещества было чрезвычайно плодотворно для практических применений (достаточно напомнить об атомной энергии).

Квантовая теория поля — это современная теория элементарных частиц. Именно она должна давать ответы на вопросы о законах, управляющих столкновениями и превращениями элементарных частиц. Однако ее изучают не

* «Природа», 1960, № 12.

только физики-теоретики, но и теоретики, занимающиеся теорией твердого тела и теорией атомного ядра, так как мощные методы, развитые в квантовой теории поля, настолько общи, что их можно с успехом применять и здесь [1].

Роль математического аппарата в современной физике

До сих пор еще распространено неправильное представление о роли математического аппарата в современной физике и о том смысле, который при этом вкладывается в это понятие.

Обычно предполагается, что роль математического аппарата хотя и важна, но второстепенна и сводится к количественному описанию явлений; первое же место всегда отводится тем идеям, которые позволяют познать явление качественно. Идея или картина явления обычно формулируется при помощи наглядных представлений, без применения математического аппарата. Так, например, когда говорят о полете спутника, то считается очевидным, что задача математического аппарата здесь заключается лишь в точном определении траектории спутника с учетом всех воздействий — и силы тяготения, и сопротивления воздуха,— в то время как приблизительный вид траектории и характер влияния этих воздействий («качественное описание») могут быть поняты без обращения к математике. И действительно, качественная картина полета спутника нам понятна, потому что она вполне наглядна, так как на основании опыта наблюдений и школьного курса физики мы знаем хорошо действие сил тяготения и сопротивления воздуха.

Но наглядные представления применимы далеко не всегда. Пожалуй, в новой физике даже трудно найти такую область, где общепринятые наглядные представления и «здравый» смысл привели бы к «здравым» результатам.

---

[1] Значительный этап в развитии этой теории составляют труды академика Владимира Александровича Фока, объединенные в монографии «Работы по квантовой теории поля». Эти работы, посвященные в основном созданию и обоснованию математического аппарата квантовой теории поля и приближенного метода расчета атомов («метод Хартри—Фока»), были удостоены в 1960 г. Ленинской премии.

Абстрактность представлений — характерная черта современных физических воззрений. В этом заключается одна из причин неудач многочисленных претендентов на объяснение явлений современной физики (главным образом квантовой физики) с точки зрения наглядных соображений. И именно вследствие этого обстоятельства математическому аппарату принадлежит решающее место в новой физике.

В отличие от ньютоновой, в современной физике фактически невозможно описать явление качественно, не пользуясь математическим аппаратом. Математические методы образуют основу современных физических теорий, и даже физическое толкование опирается на них. Роль математического аппарата в новой физике и, в частности, в физике элементарных частиц, таким образом, значительно шире той роли, которая ему обычно приписывается. Разумеется, обсуждая экспериментальные факты, ученые вполне в состоянии дать качественное объяснение «на пальцах», не обращаясь к уравнениям. Однако слова и фразы, описывающие картину явления,— по существу не что иное, как пересказ и толкование математической теории этого явления. (Известно, что математический язык — наиболее сжатый и точный язык.)

Важная роль математических методов в физике элементарных частиц видна также и в том, что сами основные понятия оказываются предметом математического исследования в теории элементарных частиц, в то время как основные понятия ньютоновой физики являются частью наших наглядных представлений. Так, понятие о координатах спутника по отношению к Земле включается нами в схему наглядных представлений, а понятия о величинах, при помощи которых описывается движение квантовых полей (например, «столбец Фока»), составляют существенную часть математического аппарата квантовой теории поля.

Развитие физики идет по пути усложнения ее математического аппарата. Квантовая теория поля широко использует такие разделы математики, как теорию групп, теорию обобщенных функций, теорию операторов и т. д. Поэтому-то так трудно популярно рассказать о сущности «столбца Фока», «пространства Фока», многовременного формализма Дирака — Фока — Подольского и других методов, связанных с именем В. А. Фока. Чем абстрактнее

математический аппарат, тем необычнее и соответствующие физические теории. По «абстрактности» представлений квантовая теория поля занимает в современной физике безусловно первое место.

Следует помнить, что абстрактность и наглядность относительны. В самом деле, наглядное представление — это представление посредством привычных моделей и понятий. Когда какая-либо область науки хорошо изучена, вырабатывается система представлений, позволяющая объяснить «наглядно» все явления в этой области. Совершенно очевидно, что наглядным путем можно объяснить только явления, не выходящие за рамки привычных теорий. Если же новые факты выходят за рамки известных теорий, то бессмысленно объяснять их с точки зрения старых представлений наглядным образом. Тогда нужно создавать новую систему представлений.

Мнения разных людей о наглядности или абстрактности объяснения физического явления часто бывают различны, так как уровень «наглядности» определяется знаниями. Опираясь на школьный курс физики и повседневный опыт, большинство людей мыслит сейчас при помощи механических моделей. Значительно меньшее число людей может сказать, что они наглядно представляют электромагнитное поле, и уже совсем ничтожное число может заявить, что для них наглядны квантовые понятия. Механические, квантовые представления и представления об электромагнитном поле образуют (каждое в отдельности) вполне стройную систему, способную объяснить явления в своей области. Понять же квантовые закономерности на основе механических представлений или представлений о поле невозможно, так же как нельзя понять электромагнитные явления при помощи механических моделей.

Весьма поучительна хорошо известная из истории физики попытка вывода свойств электромагнитного поля на основе механических воззрений. Во время развития электромагнитной теории механика достигла уже известной завершенности, хорошо объясняла многочисленные явления, представления ее были привычны, и многим казалось, что и все остальное должно укладываться в рамки механических воззрений. Для объяснения электромагнетизма было введено понятие об универсальной упругой среде, заполняющей все пустое пространство,— мировом

эфире. Все тела считались погруженными в эфир и пронизанными эфиром. Электромагнитное поле по этой модели действовало в эфире; оно было, по тогдашним представлениям, не чем иным, как механическими напряжениями в эфире. Свет рассматривался как распространение упругих колебаний в эфире.

С развитием электромагнитной теории, с открытием новых опытных фактов при такой трактовке возникало все больше трудностей. Эфир приходилось наделять самыми противоречивыми свойствами: он должен был вести себя как твердое тело при быстрых колебаниях и не сопротивляться движению планет; эфир сравнивался с жидкостью, со смолой и т. д.

В дальнейшем, в связи с этими трудностями, эфир стали рассматривать как особую материальную среду, наделенную свойствами, не имеющими ничего общего со свойствами обычных тел. Предполагалось только, что эфир может служить системой отсчета, т. е. что можно говорить о скорости Земли относительно эфира. Но и такие представления об эфире оказались неудовлетворительными. Опыт Майкельсона и другие опыты установили, что нельзя определить движение Земли относительно эфира. Понятие эфира как некоторой субстанции потеряло смысл. Нелепо было пытаться объяснить электромагнитные явления посредством упругих свойств среды — эфира, которая не могла быть обнаружена. Понятие об эфире было полностью устранено из электромагнетизма в теории относительности Эйнштейна, и теперь оно означает не более чем поэтический образ («радиоволны в эфире» и т. д.).

Но если при помощи механических моделей и нельзя сделать наглядным электромагнитное поле, то отсюда вовсе не следует, что электромагнитное поле недоступно для наглядного восприятия. Мы сможем представить себе наглядно электромагнитное поле, если изучим подробно его свойства и привыкнем к ним. Качественные соотношения, вытекающие из уравнений поля, и будут характеризовать поле «наглядным образом». Мы можем, например, представить электростатическое поле при помощи линий напряженности электрического поля и поверхностей равного потенциала; можем изобразить магнитное поле посредством магнитных силовых линий и т. д.

Мы видели, что чем необычнее закономерности природы, тем бо́льшую роль играет математический аппарат

теории. В создании его главным стимулом служит стремление найти такое математическое оформление теории, которое наилучшим образом отражает положение вещей. Иной раз проходят многие годы и даже десятилетия, прежде чем физикам удается создать окончательную математическую формулировку теории, или, как говорят, придать теории простой и изящный вид. Много первоначальных несовершенных построений при этом отпадает. Тем более удивительной кажется «живучесть» небольшого числа методов, разработанных еще в начале 30-х годов,— методов, в которых авторам удалось сразу же схватить «логику» природы. К их числу относятся и методы В. А. Фока [2].

Создание современной квантовой теории поля

Элементарные частицы — это простейшие элементы материи, которые мы сейчас условно считаем бесструктурными. Понятие «элементарная частица» отделяет то, что известно, от того, чего мы еще не знаем,— элементарность частицы определяется уровнем наших знаний.

Представление об элементарных частицах возникло при изучении строения вещества. Казалось естественным предположение, что все вещества в природе состоят из простейших неизменных и вечных камней мироздания — элементарных частиц. На первом этапе истории физики элементарными частицами считались молекулы. Затем, по мере накопления знаний, выяснилась сложность молекул, и представление об элементарности было перенесено на атомы. В некотором отношении и атомы и молекулы элементарны: химические свойства молекулы и атома неделимы, и в этом смысле молекулу можно назвать простейшей неделимой частицей вещества, а атом — простейшей неделимой частицей химического элемента.

Развитие физики в начале XX в. показало, что и атомы не элементарны. Оказалось, что атом представляет собой сложную систему, состоящую из атомного ядра и движущихся вокруг ядра электронов. При этом электрон яв-

[2] Как отмечалось в предисловии к сборнику, эта статья была посвящена В. А. Фоку, поэтому естественно, что автор останавливается в основном на его работах.— *Прим. ред.*

ляется своего рода «атомом электричества»— все заряды в природе по абсолютной величине кратны заряду электрона. После открытия в 1932 г. нейтрона стало очевидным, что атомные ядра состоят из нейтронов и простейших ядер — ядер водорода, или протонов. Представление об элементарности было перенесено на электрон, нейтрон и протон.

Эти три частицы занимают особое место среди элементарных частиц — они являются строительным материалом для атомов: нейтроны и протоны образуют атомные ядра, ядра и электроны образуют атомы. Так как вещество состоит из атомов, то эти частицы служат как бы первичными кирпичиками вещества.

Элементарные частицы обладают ничтожно малой массой: масса электрона равна $9 \cdot 10^{-28}$ *г*, а протон и нейтрон примерно в 2000 раз тяжелее электрона. Элементарные частицы движутся с большими скоростями, и поэтому скорость света $c = 3 \cdot 10^{10}$ *см/сек* выбирают в качестве величины, характеризующей масштаб скоростей в мире элементарных частиц.

Обратимся теперь к закономерностям мира элементарных частиц. На первый взгляд кажется вполне очевидным, что закономерности природы одинаковы как для массивных, так и для малых тел. Однако опыты показывают, что очень малые частицы — атомы, молекулы, элементарные частицы («микрочастицы») — ведут себя совсем иначе, чем вели бы себя маленькие камешки. Закономерности мира микрочастиц резко отличаются от закономерностей мира больших тел.

Законы движения Ньютона, столь хорошо описывающие движение обычных тел (если скорости малы), уже неприменимы при изучении движения микрочастиц. Микрочастицы движутся по законам квантовой механики. Физика массивных тел — физика макромира — предельный случай квантовой физики: для медленно движущихся массивных тел квантовые законы движения совпадают с законами Ньютона.

Переход от ньютоновой механики к квантовой означает не просто замену одних формул другими, но и переход к новым представлениям. Мир микрочастиц нельзя мыслить по образцу макромира. Микрочастицы обладают свойствами, которые с точки зрения ньютоновой механики являются взаимоисключающими. Поэтому создание

квантовой физики и признается своего рода революцией в естествознании.

Оказывается, что энергия внутренних состояний атомов, молекул, ядер может принимать только прерывные значения. Например, переход атома из одного состояния в другое сопровождается излучением или поглощением света вполне определенной энергии: излучение имеет прерывный характер. Такие порции энергии называются квантами.

Микрочастицы обладают и свойствами частиц-камешков и волновыми свойствами. Например, если пучок электронов проходит через кристалл, то на пластинке за кристаллом можно наблюдать картину, характерную лишь для волновых процессов. С другой стороны, мы можем, например, определить координату электрона, что возможно для частицы-камешка.

Помимо таких «обычных» свойств, как масса, заряд, элементарным частицам присуще и особое свойство — спин («собственное вращение частицы»). Частица со спином ведет себя подобно волчку; при этом спин нельзя ни увеличить, ни уменьшить. Возможные значения спина у частицы четко определены в квантовой механике: спин может быть равен только целому или полуцелому числу постоянных Планка $\hbar = 1{,}05 \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек.*

Однако квантовая механика — это еще не теория элементарных частиц, не квантовая теория поля. Обычная квантовая механика — это нерелятивистская теория, которая не может рассматривать движение быстрых частиц, а теория элементарных частиц должна быть прежде всего релятивистской теорией, т. е. согласоваться с теорией относительности.

Поэтому первыми работами, прокладывающими путь в квантовую теорию поля, были те работы, в которых устанавливались релятивистские уравнения движения для элементарных частиц. Первое такое уравнение — уравнение для свободной частицы, не обладающей спином, было найдено шведским физиком О. Клейном. Это уравнение было обобщено В. А. Фоком на случай, когда частица взаимодействует с электромагнитным полем (уравнение Клейна—Фока). Релятивистское уравнение для электрона, пригодное также для всех частиц со спином $\hbar/2$, было предложено затем Дираком.

Исследование релятивистских уравнений, в особенно-

сти уравнения Дирака, привело к ряду серьезных трудностей. Выход был найден Дираком, который доказал, что из его уравнения вытекает существование новой частицы — позитрона, которая в дальнейшем и была обнаружена на опыте.

Открытие позитрона и превращений электрона и позитрона было поистине революционным событием в физике элементарных частиц. Опыты установили, что позитроны могут рождаться и поглощаться: электрон и позитрон могут превратиться в кванты света — фотоны, а фотоны могут порождать электроны и позитроны. Это означало, что об элементарной частице нельзя было более думать, как об «извечном и неизменном камне вселенной». Наоборот, взаимопревращаемость элементарных частиц следовало считать их свойством.

Как же описывать математически превращения элементарных частиц? Очевидно, для этого прежде всего математический аппарат теории должен описывать процессы рождения и уничтожения. Такой метод — метод описания систем с переменным числом частиц был уже создан к этому времени. Он известен под названием метода «вторичного квантования» и был разработан сначала Дираком применительно к частицам, обладающим целочисленным спином (Дирак имел в виду кванты света). Затем немецкие ученые Иордан и Вигнер распространили этот метод на электроны.

Исчерпывающая теория вторичного квантования была дана В. А. Фоком.

В. А. Фок разработал новые понятия, из которых особого внимания заслуживает упомянутый ранее «столбец Фока» — величина, которая для описания квантового поля имеет столь же фундаментальное значение, что и напряженности E и H для описания электромагнитного поля. Именно об этом методе и пишут как о методе рассмотрения в «пространстве Фока». Каждая строчка этого столбца относится к состоянию поля с определенным числом частиц: первая строчка — к пустому пространству, вторая — к состоянию с одной частицей, третья — к состоянию с двумя частицами и т. д. Если же взять весь столбец, то он будет уже характеризовать такое состояние, когда число частиц неопределенно.

Другой метод описания квантового поля, предложенный ученым, известен под названием метода функционалов

Фока. Трудно и, быть может, даже невозможно пояснить популярно суть этого метода. Образно говоря, в методе функционалов все строчки «столбца Фока» нанизаны подобно бусам на нитке, образуя новую величину — функционал поля, которым и характеризуется состояние квантового поля. В руководствах по квантовой механике, например в знаменитой книге Дирака, он излагается как «представление Фока», причем Дирак называет этот метод элегантным.

Метод вторичного квантования с успехом используется в теории атомного ядра и теории атома. Можно было бы упомянуть, в частности, о создании В. А. Фоком на основе вторичного квантования широко известного метода расчета атомов — метода Хартри — Фока. При помощи метода Хартри — Фока определяются уровни энергии атомов и частоты света, испускаемого атомами, поляризуемость атомов и т. д. Расчеты по этому методу производятся во всех странах мира.

Метод вторичного квантования, однако, еще не составляет квантовой теории поля,— это есть метод описания квантовых полей, т. е. метод для описания процессов превращений элементарных частиц. Чтобы получить квантовую теорию поля, было необходимо добавить к ней уравнение движения (например, уравнения движения для «столбца Фока»). Заметим сразу же, что исчерпывающим образом эта задача не решена и до сих пор. То, что уже сделано квантовой теорией поля на этом пути, можно характеризовать лишь как приближения к действительности, не свободные от внутренних противоречий. Первой физической проблемой, стоявшей перед новой теорией, была проблема взаимодействия: как возникает взаимодействие частиц посредством квантового поля? В частности, как можно объяснить хорошо известное всем кулоновское взаимодействие?

В первой теории квантового поля, построенной в 1927—1930 гг. Гейзенбергом и Паули для изучения взаимодействия электронов с электромагнитным полем, решения этой проблемы не было дано. Качественное решение было дано в 1932 г. Дираком на примере движения в одном измерении. Дирак показал, что кулоновское взаимодействие электронов возникает благодаря обмену квантами света — фотонами. Один электрон излучает фотон, который поглощается другим электроном, последний в свою очередь

испускает фотон, поглощаемый первым электроном, и т. д.— электроны как бы перекидываются фотонами (см. рисунок). Эта идея для реального трехмерного движения была впервые развита Фоком и Подольским. Заметим, что когда мы говорим здесь «идея», то имеем в виду идею, возникшую в итоге изучения математического аппарата теории. В частности, в процессах, изображенных на рисунке, участвуют не реальные, а так называемые виртуальные фотоны, при излучении и поглощении которых энергия не сохраняется.

Электромагнитное взаимодействие электронов; электроны «перекидываются» фотонами

Новой квантовой электродинамике был придан окончательный вид в совместной работе Дирака, Фока и Подольского. Обычно, когда сравнивают положения частиц в пространстве, предполагается, что их координаты фиксируются в одно и то же время—времена частиц одинаковы. Однако такая процедура оказывается непоследовательной, если придерживаться теории относительности. В новой теории каждой частице приписывалось свое время. «Многовременный формализм Дирака — Фока — Подольского» был важнейшим этапом в развитии квантовой теории поля.

С открытием новых элементарных частиц — мезонов и в связи с проблемой ядерных сил представления квантовой электродинамики стали распространяться и на теорию взаимодействия мезонов с протонами и нейтронами. Согласно идее японского физика Юкавы, ядерные силы объясняются по аналогии с электромагнитными силами, только протоны и нейтроны обмениваются в ходе ядерного взаимодействия не фотонами, а мезонами. Созданием мезонной теории (использующей все перечисленные выше математические методы) и завершается первый этап развития квантовой теории поля, когда были заложены основы теории.

* * *

Мы рассказали здесь очень кратко об основном этапе развития теории элементарных частиц и поэтому могли коснуться лишь важнейших работ В. А. Фока, вошедших

в сборник «Работы по квантовой теории поля». Дальнейшее развитие этой теории не привело к изменению ее принципов. Теория была представлена в более «красивом» виде, были устранены некоторые трудности, но исходные положения остались неизменными. Теория взаимодействия электронов с электромагнитным полем (квантовая электродинамика) блестяще, с большой точностью согласуется с опытом.

Квантовую теорию поля отнюдь нельзя считать завершенной. Несмотря на замечательные успехи, в этой теории имеются еще существенные трудности. Многочисленные соображения подсказывают, что мы находимся на пороге создания новой теории элементарных частиц. Возможно, что она будет отличаться от современной столь же глубоко, как квантовая механика отличается от классической. Возможно, что новая теория потребует еще более сложного и абстрактного математического аппарата.

Но каковы бы ни были открытия, основные представления квантовой теории поля сохранят свою силу. Новая теория будет более полной, содержащей современную квантовую теорию как частный случай.

Происхождение космических лучей*

Член-корреспондент АН СССР
В. Л. Гинзбург,
кандидат физико-математических наук
М. И. Фрадкин

Космические лучи были открыты более сорока лет назад. Сразу же возник вопрос о происхождении этого неведомого ранее излучения. Однако длительное время в этом отношении приходилось довольствоваться лишь чисто гипотетическими построениями, поскольку сведения о первичных космических лучах, даже у границ атмосферы, не говоря уже о солнечной системе и межзвездной среде, полностью отсутствовали.

В 1948—1950 гг. было установлено, что в состав первичных космических лучей, кроме протонов, входят также ядра различных элементов. Наконец, в 1950—1953 гг. на основе радиоастрономических данных удалось сделать определенные заключения о распределении космических лучей в Галактике и за ее пределами. Таким образом, впервые появилась возможность изучить вопрос о происхождении космических лучей с учетом и на основе результатов наблюдений.

Теория происхождения космических лучей, построенная на этих принципах в основном советскими учеными в течение последних нескольких лет, завоевывает сейчас все более широкое признание.

Цель настоящей статьи состоит в изложении этой теории, причем, разумеется, мы остановимся также на рас-

* «Природа», 1958, № 8. Для настоящего издания статья подверглась небольшим изменениям.

смотрении экспериментальных данных, полученных в результате изучения первичных космических лучей и радиоастрономических наблюдений [1].

Первичные космические лучи у Земли

Космические лучи — это поток заряженных частиц большой энергии, приходящих на Землю из межзвездного пространства. В первичных космических лучах основная доля частиц имеет энергии 10^9—10^{10} *эв*, но встречаются также частицы с энергией 10^{15}—10^{16} и даже 10^{19} *эв*. Попадая в земную атмосферу, эти частицы взаимодействуют с атомными ядрами элементов, входящих в состав воздуха, теряя при этом энергию. В результате ядерных взаимодействий рождаются новые (вторичные) частицы — мезоны различных сортов, распад которых приводит к появлению электронов и фотонов большой энергии. Таким образом, вторичные космические лучи, наблюдаемые в атмосфере на высотах менее 10—15 *км* над уровнем моря, совершенно не похожи по своему составу на первичные космические лучи.

Вместе с тем для решения вопроса о происхождении космических лучей нужны, очевидно, сведения именно о первичных космических лучах. Такие сведения можно получить, проводя наблюдения на очень больших высотах, где еще мало вторичных частиц и почти не изменился состав первичных. Для этой цели соответствующие приборы поднимают с помощью стратостатов и шаров-зондов до высоты 20—30 *км*, а с помощью ракет и спутников — на 100 *км* и выше над поверхностью Земли.

Измерения, проведенные в различных пунктах земного шара, показали, что интенсивность космических лучей зависит от места наблюдения и в первую очередь от геомагнитной широты (широтный эффект космических лучей)[2]. Наличие широтного эффекта доказывает, что космические лучи состоят в основном из заряженных частиц

---

[1] Подробнее излагаемый ниже материал освещен в книге: В. Л. Гинзбург, С. И. Сыроватский. Происхождение космических лучей. М., Изд-во АН СССР, 1963.

[2] Магнитное поле Земли в первом приближении можно рассматривать как поле диполя. Поскольку ось диполя не совпадает с осью вращения Земли, географические и геомагнитные координаты различаются между собой.

(иначе они не отклонялись бы магнитным полем Земли). Энергия частиц различна; это видно из того, что в тех направлениях, в которых для преодоления отклоняющего действия магнитного поля Земли требуется бóльшая энергия, интенсивность космических лучей меньше, чем в тех направлениях, в которых для достижения поверхности Земли необходима меньшая энергия. Сравнение результатов теоретического расчета движения заряженных частиц в магнитном поле Земли с наблюдаемой зависимостью интенсивности космических лучей от геомагнитной широты позволяет определить распределение по энергиям (энергетический спектр) частиц в первичном потоке. Как видно из рис. 1, чем больше энергия частиц, тем меньше их число; количественно эту связь в исследованной области спектра можно представить простой степенной функцией

$$F(E > E_0) = \frac{B}{E_0^{\gamma-1}}.$$

Здесь F — поток частиц с полной энергией $E > E_0$, γ — показатель степени, несколько иной для различных частиц и равный примерно 2,0—2,6; B — коэффициент, определяющий полное число частиц данного сорта.

Основную долю в потоке первичного космического излучения составляют протоны. Поток протонной компоненты для частиц с энергией свыше $1{,}4 \cdot 10^9$ *эв* равен примерно 1 протону на 1 *см*² в секунду. Этот поток соответствует тому, что в каждом кубическом сантиметре находится в среднем около $N(E > E_0) \sim 10^{-10}$ протонов, движущихся со скоростью, близкой к скорости света. Помимо протонов, в первичном потоке присутствуют также и более тяжелые частицы — ядра различных элементов: гелия (α-частицы), углерода, кислорода, кремния, железа и др. Электронные оболочки, обычно окружающие эти ядра, в данном случае полностью отсутствуют (сорваны при движении в межзвездной среде). Поэтому тяжелые частицы, встречающиеся в первичном потоке, отличаются от протонов не только массой, но и зарядом. Именно это обстоятельство и позволило обнаружить их в космических лучах. Известно, что ионизация, создаваемая в веществе быстрой заряженной частицей, при прочих равных условиях пропорциональна квадрату заряда. Быстрые однозарядные частицы оставляют в ядерных фотоэмульсиях тонкие следы в виде редких точек. Между тем после экс-

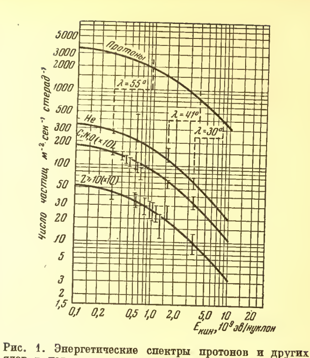


Рис. 1. Энергетические спектры протонов и других ядер в первичных космических лучах, найденные по измерению потоков на различных широтах

На оси ординат отложен поток частиц в данном направлении с кинетической энергией, большей отложенной на оси абсцисс энергии $E_{\text{кин}}$ (в единицах 10^9 *эв/нуклон*). Ордината двух нижних кривых увеличена в 10 раз (λ — геомагнитная широта, Z — заряд)

позиции эмульсий на больших высотах в них были найдены также «жирные» плотные следы большой протяженности (рис. 2). Поскольку появление в фотоэмульсии следов заряженных частиц является следствием ионизации, производимой этими частицами, то «жирные» протяженные следы в фотоэмульсии естественно приписать частицам, заряд которых больше единицы. Изучение многозарядных частиц в первичных космических лучах, проводившееся с применением различной методики, в большинстве случаев позволило довольно хорошо установить распределение первичных частиц по зарядам, т. е. узнать



Рис. 2. Примеры следов в фотоэмульсиях, оставленных на большой высоте быстрыми ядрами с различным зарядом. Сверху вниз: след протона, ядра He, ядра O, ядра Fe

Таблица 1

Относительное содержание ядер в первичных космических лучах и в среднем в природе

Ядра	В первичных космических лучах на 10^5 протонов	В среднем в природе на 10^5 атомов водорода
Протоны (p)	100 000	100 000
α-частицы (Z = 2)	7 000	7 700
Группа L (Li, Be, B; Z = 3—5)	200	$3{,}6 \cdot 10^{-4}$
Группа M (C, N, O, F; Z = 6—9)	500	80
Группа H ($Z \geqslant 10$)	200	30
Железо (Fe; Z = 26)	30	1,5
Все ядра с $Z > 30$	< 1	10^{-3}

состав первичного потока. Современные данные о составе первичных космических лучей приведены в табл. 1.

Важно отметить, что соотношение между потоками различных групп ядер, в пределах точности измерений, не зависит от геомагнитной широты. Это указывает на примерно одинаковый вид энергетических спектров всех ядер в космических лучах в области энергий до $2 \div 3 \cdot 10^{10}$ *эв/нуклон* (полная энергия ядра равна, очевидно, произведению атомного веса ядра на энергию, приходящуюся на 1 нуклон).

Электроны, позитроны и фотоны в составе первичных космических лучей еще не обнаружены. Пока можно лишь указать, что их число не превосходит примерно 1% от полного числа частиц в первичном потоке космических лучей [3].

С большой степенью точности установлено, что первичный поток космических лучей остается постоянным во вре-

---

[3] В 1961 г. удалось обнаружить в составе космических лучей небольшое количество электронов. Возможно, однако, что появление наблюдавшихся электронов связано с процессами, происходящими на Солнце.

мени [4]; с учетом вращения Земли это означает, что со всех направлений приходит одно и то же число частиц. Это свойство потока космических лучей — его изотропия — весьма важно.

Таким образом, в настоящее время состав и свойства первичных космических лучей в основных чертах известны. Однако ряд таких вопросов, как состав космических лучей при очень высоких энергиях, наличие ядер тяжелее железа, требует дальнейших экспериментальных исследований. Для решения многих из этих задач необходимо поднимать приборы на еще бо́льшую высоту, чем высоты, обычно используемые до сих пор. В этой связи особенно существенно использование аппаратуры на искусственных спутниках Земли, длительное время движущихся в тех областях пространства, где практически нет атмосферы и где регистрируются именно первичные космические лучи.

Космическое радиоизлучение и космические лучи

Как бы ни были полны сведения о первичных космических лучах у Земли, их, однако, совершенно недостаточно для построения теории происхождения космических лучей, образующихся где-то вдали от Земли. Поэтому весьма велика роль радиоастрономических данных, которые позволяют получать существенные сведения о космических лучах в межзвездном пространстве, далеко за пределами не только Земли и солнечной системы, но в ряде случаев и вдали от нашей Галактики.

Теперь хорошо известно, что регистрируемое на Земле космическое радиоизлучение состоит из нескольких различных по своему характеру и природе компонент. Космическое радиоизлучение галактического происхождения можно разделить на слабо зависящее от направления «общее» радиоизлучение Галактики и на излучение отдель-

---

[4] Интенсивность первичного потока испытывает вариации (колебания), составляющие лишь доли процента, но иногда наблюдаются и более сильные изменения. Все эти вариации в конечном счете обусловлены процессами, происходящими на Солнце. Поток первичных космических лучей, «очищенный» от вариаций солнечного происхождения в пределах достигнутой точности измерений, постоянен.

ных дискретных источников. Общее радиоизлучение Галактики в свою очередь складывается из теплового излучения межзвездного газа и «нетепловой» составляющей, характеризуемой весьма большой интенсивностью и специфической зависимостью интенсивности от частоты. Кроме того, наблюдается радиоизлучение внегалактического происхождения.

В настоящее время общепринято объяснение, согласно которому нетепловая составляющая космического радиоизлучения представляет собой излучение релятивистских электронов, движущихся в межзвездных магнитных полях (магнитнотормозное излучение).

Каков механизм магнитнотормозного излучения? Прежде всего надо напомнить, что любая заряженная частица испускает электромагнитное излучение, если она движется с ускорением. Пример такого процесса — испускание рентгеновых лучей при бомбардировке поверхности антикатода потоком электронов, тормозящихся (т. е. ускоряемых) в веществе антикатода. Испускаемое в этом случае рентгеновское излучение со сплошным частотным спектром называется *тормозным*.

Заряженные частицы, попадая в магнитное поле, движутся, как известно, не по прямой, а по винтовой линии. В частном случае, когда направление скорости частицы перпендикулярно силовым линиям однородного в пространстве и постоянного во времени магнитного поля, траектория частицы представляет собой окружность. Всякое криволинейное движение — это движение с ускорением, и поэтому заряженная частица, движущаяся в магнитном поле, также должна излучать электромагнитные волны. Такое излучение и называется *магнитнотормозным* или синхротронным. Расчеты показывают, что для частиц весьма высокой энергии $E \gg mc^2$ магнитнотормозное излучение обладает практически непрерывным спектром, причем максимум интенсивности излучения соответствует частоте

$$\omega_{max} \sim \frac{eH_\perp}{mc}\left(\frac{E}{mc^2}\right)^2;$$

здесь c — скорость света, m и e — масса покоя и заряд частицы и $H_\perp$ — перпендикулярная к скорости частицы составляющая магнитного поля. При этом излучение обладает заметной интенсивностью лишь в направлении дви-

жения частицы в рассматриваемый момент, т. е. частица излучает в основном по касательной к траектории. Такое магнитнотормозное излучение, приходящееся на видимую область спектра, наблюдается в земных условиях в синхротронах — установках, предназначенных для ускорения электронов до весьма больших энергий. В магнитном поле синхротрона электроны движутся по круговой орбите, и если смотреть в направлении касательной к орбите навстречу движению электрона, то можно увидеть свечение на орбите, в то время как при наблюдении в противоположном направлении (тоже по касательной к орбите) такого свечения не видно.

Согласно современным астрофизическим представлениям, в межзвездном пространстве существуют магнитные поля с напряженностью $H \sim 10^{-5} \div 10^{-6}$ *эрстед* [5]. При движении в таком поле электрон с энергией $10^8 \div 10^9$ *эв* будет давать магнитнотормозное излучение, длина волны которого лежит в радиодиапазоне (метровые и сантиметровые волны). Если предположить, что энергетический спектр электронов, как и других частиц первичного потока, имеет вид $F(E > E_0) = \frac{C_e}{E_0^{\gamma-1}}$, то, сравнивая вычисленную зависимость интенсивности радиоизлучения от частоты с наблюдаемым спектром радиоизлучения, можно найти, что $\gamma \approx 2{,}6 \div 3{,}0$. Если сопоставить вычисленное значение интенсивности с измеренным, то можно найти также значение постоянной C_e и таким образом определить концентрацию электронов, необходимую для создания наблюдаемого радиоизлучения. Оказывается, что концентрация электронов с энергией больше 10^9 *эв* должна составлять по порядку величины 10^{-13}, а с энергией больше 10^8 *эв* — уже $2{,}5 \cdot 10^{-11}$ частиц в 1 *см*^{3}. Как указывалось выше, в первичном потоке космических лучей электроны с энергией больше 10^9 *эв* составляют около 1% всех частиц, т. е. их концентрация должна быть порядка 10^{-12} в 1 *см*^{3}. Что касается первичных электронов с энергией, меньшей 10^9 *эв*, то в настоящее время об их потоке у Земли нельзя сказать ничего определенно-

---

[5] Напомним для сравнения, что магнитное поле Земли, вызывающее отклонение стрелки компаса, имеет на наших широтах напряженность около $0{,}4 \div 0{,}5$ *эрстед*.

го, так как частицы космических лучей, импульс которых меньше 10^9 *эв/с* (электроны с кинетической энергией меньше 10^9 *эв* и протоны с кинетической энергией меньше $4 \cdot 10^8$ *эв*), обычно вообще не доходят до нашей планеты. Такое «обрезание» энергетического спектра первичных частиц обусловлено действием магнитного поля, существующего в солнечной системе и «отсеивающего» частицы с малым импульсом. Как показывают наблюдения, напряженность «отсеивающего» поля меняется со временем, причем она уменьшается в годы минимума солнечной активности. Следовательно, можно надеяться, что, измеряя интенсивность космических лучей в этот период, удастся найти электроны с энергией порядка 10^8 *эв*, которых, согласно радиоастрономическим данным, должно быть сравнительно много [6]. Во всяком случае, следует отметить, что данные прямых измерений потока электронов и выводы, основанные на радиоастрономических наблюдениях, не противоречат друг другу.

Движение частиц космических лучей в Галактике

Радиоастрономические наблюдения позволяют определить ту область пространства, в которой имеются космические лучи. Слабая зависимость интенсивности радиоизлучения от направления наблюдения указывает, что эта область имеет форму, близкую к сфере, в экваториальной плоскости которой расположена основная часть звезд нашей Галактики. Таким образом, звездная Галактика оказывается окруженной своеобразной «короной», которая испускает радиоволны. О том же свидетельствует результат исследования радиоизлучения близкой к нам туманности M31 (в созвездии Андромеды), которая является галактикой, очень сходной с нашей. Было установлено, что, в то время как видимая форма туманности M31 представляет собой плоский диск, радиоизлучение испускается областью значительно большего размера, имеющей форму сфероида (рис. 3).

Радиус области, занимаемой космическими лучами в нашей Галактике, составляет примерно $5 \cdot 10^{22}$ *см*, т. е.

---

[6] Ближайший период минимума солнечной активности ожидается в 1964—1965 гг.

около 50 000 световых лет. В том же объеме присутствуют слабые магнитные поля, о которых говорилось ранее, а также разреженный межзвездный газ с концентрацией, не превосходящей 0,01 частицы в 1 *см*³ (этот газ в основном состоит из водорода). Вблизи галактической плоскости плотность газа выше и в отдельных межзвездных «облаках» достигает 10 частиц в 1 *см*³.

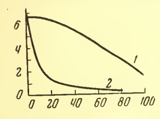


Рис. 3. Кривые распределения интенсивности радиоизлучения (*1*) и оптического излучения (*2*) для туманности М31. По оси абсцисс — расстояние от центра (угловые минуты), по оси ординат — интенсивность в условных единицах. Видно, что оптический размер туманности порядка 20′, а «радиоразмер» более 100′

Так как магнитные поля в большей части Галактики ориентированы, по-видимому, случайным образом, заряженные частицы при своем движении неоднократно испытывают на этих полях «рассеяние», меняя направление движения при переходе из области с одной ориентацией магнитного поля в область с другой ориентацией, и, таким образом, полностью «забывают» о своем первоначальном направлении движения. Этим и объясняется наблюдаемая изотропия космических лучей.

Двигаясь в галактической «короне» по искривленным, запутанным траекториям, частицы космических лучей проходят очень большие расстояния. Хотя плотность межзвездного газа очень мала, при длительном движении в этом газе появляется заметная вероятность столкновения частиц космических лучей с ядрами атомов межзвездного водорода. В результате этих столкновений протоны космических лучей теряют энергию, расходуя ее в основном на образование мезонов, и выходят из состава космических лучей. Сложные ядра при таких столкновениях расщепляются на более простые, что приводит к изменению состава космических лучей. В частности, при расщеплении ядер с зарядом $Z \geqslant 6$ могут образоваться и ядра таких элементов, как Li, Be и B. Распространенность этих элементов в природе ничтожно мала, и соответствующие ядра вряд ли могут в заметном числе ускоряться в источниках космических лучей. Следовательно, определяя содер-

жание Li, Be и B в первичном потоке у Земли, можно получить сведения о числе соударений частиц космических лучей с атомами межзвездного газа.

Столкновения с атомами межзвездного водорода определяют время жизни частиц космических лучей в Галактике. В табл. 2 приведены данные о пробеге и времени жизни различных составляющих космических лучей. В табл. 2 принято, что средняя концентрация межзвездного газа

Таблица 2

Ядерная длина пробега в межзвездной среде

Ядро ($\overline{A}$ — средний атомный вес)	Длина пробега в $г/см^2$	Длина пробега в $см$ при $n = 0{,}03\ см^{-3}$	Время жизни T в годах
Протон	67	$1{,}2 \cdot 10^{27}$	$1{,}26 \cdot 10^{9}$
α-частица	12,5	$2{,}2 \cdot 10^{26}$	$2{,}4 \cdot 10^{8}$
Группа L ($\overline{A} = 8$)	7,5	$1{,}4 \cdot 10^{26}$	$1{,}45 \cdot 10^{8}$
Группа M ($\overline{A} = 14$)	5,0	$9 \cdot 10^{25}$	$9{,}5 \cdot 10^{7}$
Группа H ($\overline{A} = 30$)	3,0	$5{,}4 \cdot 10^{25}$	$5{,}7 \cdot 10^{7}$
Железо ($\overline{A} = 56$)	1,9	$3{,}5 \cdot 10^{25}$	$3{,}6 \cdot 10^{7}$

в Галактике (т. е. во всей области, занятой космическими лучами) составляет 0,03 частицы в 1 $см^3$. Однако возможно, что средняя плотность газа в Галактике в несколько раз меньше, что привело бы к увеличению времени жизни частиц. С другой стороны, нужно учитывать также вероятность выхода космических лучей в межгалактическое пространство, что, разумеется, уменьшает их время жизни в Галактике. Удельный вес этого процесса еще недостаточно ясен. Ниже мы примем, что значения, приведенные в табл. 2, определяют некоторое эффективное время жизни частиц. Поскольку это время даже для протонов меньше времени существования самой Галактики, мы будем в дальнейшем считать Галактику неизменной.

Статистический механизм ускорения частиц

При движении в межзвездном пространстве частицы космических лучей могут не только терять энергию, но, при определенных условиях, и приобретать ее. Так, если

в среднем магнитное поле Галактики возрастает со временем, то индуцируемое при этом электрическое поле будет ускорять заряженные частицы. Однако, согласно имеющимся астрофизическим данным, если такое возрастание и происходит, то оно дает лишь ничтожный эффект.

Другой механизм, способный в принципе ускорить частицы космических лучей до гигантских энергий,— это так называемый статистический механизм ускорения, на котором мы остановимся несколько подробнее. Его действие можно пояснить на следующем примере. Представим себе смесь двух разреженных газов, из которых один состоит из тяжелых частиц, движущихся беспорядочно с некоторой небольшой скоростью u, а другой газ — из легких частиц, движущихся также хаотически с некоторой большей скоростью v. Пусть отношение массы легкой частицы m к массе тяжелой частицы значительно меньше отношения скоростей u/v. Тогда простое рассмотрение показывает, что при упругом соударении движущихся навстречу друг другу легкой и тяжелой частиц абсолютная величина скорости легкой частицы изменится при центральном ударе примерно на $2\,u$, а скорость тяжелой останется почти постоянной. При нецентральном ударе изменение скорости легкой частицы меньше $2\,u$, но в общем такого же порядка величины. При этом получается так, что при столкновении частиц, двигавшихся навстречу друг другу («встречные» соударения), скорость легкой частицы увеличится, а при столкновении частиц, двигавшихся в одном и том же направлении (столкновения «вдогонку»), произойдет уменьшение скорости легкой частицы. Если оценить вероятность столкновений обоих типов, то оказывается, что «встречные» соударения более вероятны, чем столкновения «вдогонку». Поэтому в результате многочисленных столкновений легких частиц с тяжелыми будет происходить преимущественно ускорение легких частиц, переход энергии от «тяжелого» к «легкому» газу [7].

---

[7] Сказанное справедливо лишь при условии, что кинетическая энергия тяжелых частиц $\frac{Mu^2}{2}$ в среднем больше кинетической энергии легких частиц $\frac{mv^2}{2}$. Подобное условие мы предполагаем выполненным.

Аналогичное явление может происходить и с частицами космических лучей, блуждающими в межзвездном пространстве. Ранее уже указывалось, что в межзвездном пространстве существуют магнитные поля. Допустим, что эти магнитные поля имеют «облачную» структуру. Это означало бы, что в межзвездном пространстве имеются более или менее резко ограниченные области, в которых магнитное поле сильнее, чем в окружающем пространстве. При попадании частицы космических лучей в такое движущееся намагниченное «облако» она, под действием магнитного поля, отклоняется от первоначального направления, ее траектория искривляется, и в результате частица отлетает от облака, как при соударении с какой-нибудь тяжелой частицей. Таким образом, в некотором приближении можно рассматривать это столкновение как соударение легкой и тяжелой частиц, причем роль тяжелой частицы играет облако как целое. Если произвести расчет, то оказывается, что в результате таких столкновений полная энергия частиц космических лучей E будет увеличиваться таким образом, что среднее изменение энергии ΔE за время Δt составит

$$\Delta E = \frac{u^2}{c^2\tau} E \cdot \Delta t = \alpha E \cdot \Delta t,$$

где u — скорость облака, c — скорость света и τ — эффективное время свободного пробега частицы между ее соударениями с облаками. Для медленных частиц $E \approx \approx Mc^2$, т. е. возрастание их энергии пропорционально массе частицы M.

Рассмотрение такого статистического механизма приводит к выводу, что энергетический спектр ускоренных частиц должен иметь вид степенной функции

$$N(E > E_0) = \frac{C}{E_0^{\gamma-1}},$$

причем показатель степени $\gamma = 1 + \frac{1}{\alpha T}$, где α — упоминавшийся выше коэффициент, а T — время жизни частиц в рассматриваемых условиях.

В 1949 г. Ферми высказал предположение, что частицы космических лучей ускоряются в межзвездном пространстве именно в результате действия описанного статистического механизма. Принятая выше модель несущих маг-

нитные поля облаков, конечно, неточна в применении к Галактике. Тем не менее качественно она передает суть дела, если только магнитные поля в Галактике или какой-нибудь ее части являются хаотическими. Эти поля движутся с такой же скоростью, как и межзвездный газ, и, таким образом, некоторое статистическое ускорение в межзвездном пространстве действительно должно иметь место. Однако если такое ускорение играет основную роль в процессе «разгона» частиц космических лучей до скоростей, близких к скорости света, а потери энергии этими частицами имеют ядерную природу, то энергетические спектры различных групп ядер (протонов, α-частиц, более тяжелых ядер) должны заметно различаться, так как все они имеют различное время жизни T и $\gamma = 1 + \frac{1}{\alpha T}$ будет различно для разных ядер. Между тем, как указывалось ранее, энергетические спектры всех групп ядер практически имеют один и тот же вид. Такое противоречие, а также оценка значения коэффициента α на основе астрофизических данных и некоторые другие соображения показывают, что статистический механизм ускорения в условиях Галактики скорее всего неэффективен. Однако идея статистического ускорения сама по себе весьма интересна, и в других условиях статистический механизм, по всей вероятности, может играть существенную роль для генерации первичных космических лучей. Мы имеем в виду действие статистического механизма в областях с интенсивным движением газовых масс: в оболочках новых и сверхновых звезд, атмосферах Солнца и звезд и в других объектах.

Сверхновые и новые звезды как источники космических лучей

К настоящему времени открыто большое число дискретных источников радиоизлучения, т. е. небольших областей на небесной сфере, из которых приходит более интенсивное излучение, чем из соседних участков неба. Почти все эти дискретные источники радиоизлучения, если говорить о наиболее мощных, удалось отождествить с определенными видимыми астрономическими объектами, оказавшимися туманностями разных типов. Некоторые из этих туманностей находятся вне нашей Галак-

тики и представляют собой отдаленные галактики или скопления галактик. Другие радиоизлучающие туманности принадлежат к нашей Галактике, и их местоположение совпадает с положением вспыхнувших в прошлом сверхновых звезд.

Исследование природы радиоизлучения дискретных источников показало, что в большинстве случаев это излучение не может быть тепловым, а носит магнитнотормозной характер, т. е. является излучением релятивистских заряженных частиц, движущихся в магнитных полях туманности. Если спектр радиоизлучения туманности известен, то можно найти вид энергетического спектра релятивистских электронов, имеющихся в этой туманности. С другой стороны, зная интенсивность радиоизлучения и оценив напряженность магнитного поля в туманности, можно определить концентрацию релятивистских электронов, а отсюда и энергию всех релятивистских электронов в туманности. Такие оценки, проведенные, в частности, для туманностей, представляющих собой остатки сверхновых звезд, привели к заключению, что энергия релятивистских электронов в таких туманностях составляет $10^{45} \div 10^{48}$ *эрг*. Следовательно, в результате вспышки сверхновой звезды образуются релятивистские электроны, несущие энергию не меньше $10^{45} \div 10^{48}$ *эрг*. Предполагается, что в Галактике сверхновые вспыхивают один раз примерно в 50 лет; тогда мощность генерации релятивистских электронов сверхновыми составит $10^{36} \div 10^{39}$ *эрг/сек*.

После вспышки сверхновой ее оболочка расширяется со скоростью нескольких тысяч километров в секунду и постепенно расплывается в межзвездном пространстве. Релятивистские электроны, содержавшиеся в оболочке сверхновой, попадают в межзвездное пространство, пополняя число имевшихся там электронов, определенная доля которых уже потеряла свою энергию в результате генерации радиоизлучения. Суммарные потери энергии электронами на радиоизлучение во всей Галактике составляют примерно 10^{38} *эрг/сек*. Как видно, энергия, поставляемая в электронную компоненту при вспышках сверхновых, примерно такая же, какая теряется вследствие магнитотормозного излучения. Точность полученных данных, однако, еще недостаточна, и может оказаться, что существенная доля электронной компоненты космиче-

ских лучей в Галактике — вторичного происхождения. Мы имеем в виду появление электронов в результате распада мезонов, образующихся при ядерных взаимодействиях протонов и ядер космических лучей с ядрами атомов межзвездного газа[8].

Если при вспышке сверхновой генерируются релятивистские электроны, то естественно ожидать образования и более тяжелых частиц. Хотя положение с этими двумя компонентами совершенно различное (электроны мы «видим» в остатках сверхновых, а вывод о присутствии там протонов и ядер — лишь обобщение наших знаний), нет никаких разумных доводов против того, что в оболочках сверхновых имеются релятивистские ядра.

Более подробный анализ механизма ускорения частиц в оболочках сверхновых показывает, что энергия, передаваемая протонам и ядрам, может в 10 раз и более превышать энергию, передаваемую электронам. Оценка суммарной энергии, переходящей при вспышке сверхновой в энергию протонов и более тяжелых ядер, дает величину порядка $10^{47} \div 10^{51}$ *эрг*, что соответствует средней мощности $10^{38} \div 10^{42}$ *эрг/сек*. С другой стороны, можно показать, что потери энергии протонами и ядрами в Галактике составляют примерно $10^{39} \div 10^{40}$ *эрг/сек*[9]. Как видим, и в этом случае с точки зрения энергетического баланса сверхновые вполне могут быть источниками входящих в состав космических лучей протонов и ядер. Если еще учесть, что новые звезды, вспышки которых в Галактике происходят примерно 100 раз в год, также могут служить

---

[8] По последним данным, роль вторичных электронов в Галактике невелика.

[9] Объем области, занятой космическими лучами, составляет примерно $3 \cdot 10^{66}$ *см*^{3} $(V \approx \frac{4}{3}\pi R^3)$; плотность энергии потока космических лучей в среднем $w \approx 1$ *эв/см*^{3} $\approx 10^{-12}$ *эрг/см*^{3} (имеется примерно 10^{-10} *частиц/см*^{3} с энергией порядка 10^9 *эв*). Таким образом, полная энергия космических лучей в Галактике равна $W = Vw \approx 3 \cdot 10^{55} \div 3 \cdot 10^{56}$ *эрг* (неточность связана с приближенным характером выбранных значений w и V). Потеря энергии космических лучей в единицу времени равна энергии W, деленной на время жизни $T \approx 10^9$ лет $\approx 3 . 10^{16}$ сек. (так как основную роль играют протоны, то из табл. 2 взято значение для времени жизни протонов). Отсюда и получается, что потеря энергии есть $\frac{W}{T} \approx 10^{39} \div 10^{40}$ *эрг/сек*.

источником частиц большой энергии, то становится ясно, что с энергетической точки зрения нет трудностей для объяснения происхождения космических лучей в результате вспышек сверхновых и новых звезд. Следует отметить, что заключение далеко не тривиально. Например, если предположить, что космические лучи генерируются на звездах, подобно тому как это происходит на Солнце, то полная энергия, которую способны передать в единицу времени протонам и другим ядрам все 10^{11} звезд нашей Галактики, составит всего лишь 10^{33} *эрг/сек*, что на 6—7 порядков меньше энергии, теряемой космическими лучами в Галактике [10].

Итак, утверждение, что сверхновые являются источниками космических лучей, основывается, по существу, на вытекающих из наблюдений данных о присутствии релятивистских электронов в оболочках сверхновых звезд, а также на оценке «энергетических возможностей» сверхновых.

Для решения всей проблемы происхождения космических лучей интересно, кроме того, знать, каков возможный механизм ускорения и как его действие приводит к появлению у потока космических лучей тех его характерных особенностей, о которых шла речь в начале статьи. В настоящее время наши сведения о причине вспышек сверхновых, о характере выброса вещества и расширения оболочки еще слишком бедны, чтобы можно было создать законченную количественную теорию всего явления. Однако можно рассмотреть в условиях оболочки сверхновой действие статистического механизма ускорения, оказавшегося неэффективным в межзвездном пространстве.

При взрыве сверхновой в выброшенной из нее оболочке происходят бурные движения, которые в условиях высокой проводимости ионизированного вещества оболочки приводят к образованию магнитных полей, неоднородных в пространстве и меняющихся во времени. Таким образом, при взрыве сверхновой возникают условия, благоприятные для статистического ускорения. Скорости перемещения и масштабы магнитных полей в оболочке таковы, что коэффициент α, характеризующий скорость приобретения энергии, достигает значения $10^{-7} \div 10^{-8}$ *сек*$^{-1}$,

---

[10] На Солнце образуются космические лучи со средней мощностью порядка 10^{22} *эрг/сек*.

что на 10 порядков больше, чем в случае межзвездного ускорения. И хотя такие условия существуют сравнительно недолго, быть может, всего несколько лет, частицы могут успеть ускориться до энергии космических лучей. При этом время, в течение которого происходит ускорение, и скорость приобретения энергии зависят лишь от характера взрыва и дальнейшего расширения оболочки, но не зависят от сорта частиц. По этой причине показатель степени γ в энергетических спектрах частиц, ускоренных в результате вспышки сверхновой, не должен зависеть от сорта частиц. Конечно, энергетический спектр частиц, ускоренных при вспышке одной сверхновой, может несколько отличаться от спектра частиц, ускоренных при вспышке другой сверхновой; как показывают радионаблюдения, это и имеет место в действительности. Спектр космических лучей, регистрируемых на Земле, есть по существу результат сложения множества различных спектров, которые фактически довольно близки один другому ($\gamma \approx 1 \div 3$).

Новые и сверхновые звезды распределены в основном в галактической плоскости с некоторым сгущением вблизи центра Галактики. Поэтому если бы межзвездное пространство не содержало магнитных полей, то наблюдался бы максимум интенсивности космических лучей в направлении на центр Галактики. Однако под действием хаотических магнитных полей частицы движутся по очень сложным траекториям, заходя в галактическую «корону». Этим и объясняется наблюдаемая изотропия первичных космических лучей вблизи нашей планеты.

При движении частиц космических лучей в межзвездном пространстве их состав будет заметно меняться. Так, должны появляться в заметном количестве ядра Li, Be и B. Кроме того, должно измениться соотношение между потоком протонов и потоками α-частиц и других ядер. Это изменение существенным образом зависит от пространственного распределения источников космических лучей: оно велико в случае равномерного распределения источников в Галактике и заметно меньше в случае концентрации источников вблизи плоскости Галактики. Но даже в последнем случае поток легких ядер Li, Be, B в космических лучах вблизи Земли должен составлять не менее 0,1 потока ядер C, N, O, F, даже если легкие ядра совершенно не ускоряются при вспышках сверхновых

и новых звезд в силу их весьма малой концентрации в этих источниках.

Этот результат находится в согласии с приведенными в табл. 1 данными о составе первичных космических лучей.

Резюмируя, можно утверждать, что предположение о генерации космических лучей в результате вспышек сверхновых и новых звезд допустимо и достаточно для объяснения известных фактов. Правда, точность многих использованных сведений и приведенных оценок еще недостаточна для того, чтобы считать это заключение строго доказанным. Может случиться, например, что какая-то часть энергии космических лучей имеет метагалактическое происхождение (в особенности это относится к частицам с самой большой энергией $E > 10^{15}$ *эв*). Возможны, конечно, и другие уточнения теории происхождения космических лучей. В этом отношении главную роль должны сыграть новые, еще отсутствующие в настоящее время экспериментальные данные. Можно, тем не менее, предполагать, что изложенная выше теория не претерпит в будущем радикальных изменений в своих основах и не разделит в этом отношении судьбу многочисленных гипотез, выдвигавшихся в прошлом для объяснения происхождения космических лучей.

Галактические скитальцы*

А. М. Корец, З. Л. Понизовский[1]

Природа космических лучей

Все космические тела в галактиках — звезды, межзвездные пыль и газ, планеты и метеориты — движутся со сравнительно небольшими относительными скоростями, которые не превышают сотен километров в секунду. Но космические лучи (частицы различного заряда и массы) пронизывают во всех направлениях пространство со скоростью, близкой к скорости света. Даже у самых медленных и тяжелых частиц космических лучей, обнаруженных у поверхности Земли, скорость превышает 100—200 тыс. *км/сек*.

В последнее время космические лучи занимают все больше места в астрофизических исследованиях. И это не удивительно. Ведь плотность энергии космических лучей в межзвездном пространстве имеет примерно такую же величину, как и плотность энергии магнитного поля, которому сейчас придают такое большое значение при решении задачи о происхождении и формировании галактик и галактических тел.

Огромную роль играют космические лучи и для исследования элементарных частиц и их взаимодействий при высоких энергиях. Здесь природа предоставляет

* «Природа», 1961, № 7.

[1] Статья написана по материалам доклада члена-корреспондента АН СССР В. Л. Гинзбурга на семинаре в Институте физических проблем АН СССР.

исследователю такие возможности, о которых даже и мечтать нельзя в наших лабораториях. На крупнейших ускорителях можно получить частицы с энергией около 30 *Бэв*, в то время как энергетический спектр космических лучей лежит в пределах от 1 до 10^{10} *Бэв*!

Состав первичного космического излучения у Земли

На поверхности Земли почти невозможно наблюдать первичное космическое излучение, так как врывающиеся в атмосферу частицы сталкиваются с ядрами атомов атмосферных газов и создают потоки вторичных частиц. Поэтому основные наблюдения проводятся на шарах-зондах и стратостатах, поднимающихся до высоты 40 *км*. При этом над ними остается еще слой вещества[2] в несколько граммов на квадратный сантиметр. В таком слое вероятность столкновения уже невелика, и появляется возможность анализировать первичное космическое излучение. Еще лучшие данные можно получить на космических ракетах и спутниках.

В состав космического излучения входят, по-видимому, все известные химические элементы легче железа[3], но относительное их количество резко отличается от распространенности этих элементов во вселенной, где водород составляет около 90%, гелий — около 9%, а все остальные элементы — только 1%. Относительное число ядер элементов, более тяжелых, чем гелий, в космических лучах в 5—6 раз больше, чем во вселенной. В частности, лития, бериллия и бора на Земле почти нет, а в космическом излучении их только втрое меньше, чем C, N, O, F, причем бора больше, чем лития, а C больше, чем O, в то время как во вселенной имеется обратное соотношение. По количеству ядер Li, Be и B можно вычислить, что космические лучи прошли межзвездную среду толщей 5—10 *г/см*^{2}.

Из такого изменения в распределении элементов следует, что предположение об ускорении и генерации в

[2] Весь слой воздуха над поверхностью Земли составляет около 1 *кг/см*^{2}.

[3] Античастицы в космическом излучении не обнаружены. Ошибки измерения и, следовательно, возможное количество античастиц не превышают 0,1%.

источниках космических лучей в основном тяжелых ядер группы железа и хрома не противоречит экспериментальным данным.

Существенно, что в космических лучах, по-видимому, очень мало ядер с атомным весом 17—23. Если этот провал нельзя будет объяснить характером расщепления железа и хрома при столкновениях с протонами и ядрами гелия в межзвездной среде, то это будет аргументом против изложенного предположения. Этот факт может быть проверен на ускорителях при обстреле, например, железа пучками протонов и α-частиц.

Энергия космических частиц вблизи Земли

Распределение первичных частиц по энергиям, т. е. их энергетический спектр, определяется, в частности, по отклонению этих частиц магнитным полем Земли. Чем больше величина энергии, тем меньшее число частиц обладает ею, причем характер этого спектра не зависит от атомного веса частицы.

Частиц с кинетической энергией меньше 0,2÷0,4 *Бэв* в первичных космических лучах не наблюдается. По-видимому, магнитные поля, несущиеся от Солнца вместе с корпускулярными потоками, полностью отклоняют эту мягкую компоненту космического излучения из солнечной системы. При энергии больше 10^{15} *эв* мы не можем судить об их энергетическом спектре, так как число частиц с очень высокой энергией невелико. Через 1 $м^2$ пролетает не больше 1 частицы с энергией больше 10^{15} *эв* за сто часов, а частицу с энергией большей 10^{18} *эв* пришлось бы ждать на площади в 1 $м^2$ в среднем несколько тысяч лет. Правда, создаются установки с эффективной площадью в несколько квадратных километров, на которых можно будет обнаружить частицу с энергией 10^{19} *эв* около одного раза в сутки.

Насколько значительна энергия элементарной частицы в 10^{19} *эв*, можно судить хотя бы по тому, что этой энергии хватило бы, чтобы зажечь лампочку мощностью в 1 *вт* на полторы секунды! Микроскопическая частица дала бы макроскопический эффект!

В составе первичного космического излучения пока не обнаруживаются фотоны, вблизи Земли не зарегистриро-

ваны также электроны и позитроны[4]. Между тем в Галактике в составе космических лучей электроны играют значительно бо́льшую роль.

Угловое распределение космических лучей

Было бы очень важно узнать, существуют ли преимущественные направления движения космических лучей. Предполагалось, что такими направлениями может быть либо плоскость Галактики, либо ось того спирального ее рукава, в котором находится солнечная система. Здесь надо оговориться, что, кроме галактических, на Землю падает поток космических частиц, излучаемых Солнцем. Если исключить этот сравнительно небольшой поток, что нетрудно сделать, то окажется, что с точностью до ошибок измерения, не превышающих $1 \div 3\%$, к Земле со всех сторон приходит совершенно одинаковый поток космических лучей. Это означает, что космическое излучение в Галактике изотропно.

Непосредственно на Земле мы можем наблюдать ту часть космического излучения, которая пришла из недр вселенной в виде атомных ядер. Наблюдаемые экспериментально электроны, позитроны, мезоны возникли в результате вторичных процессов в атмосфере.

Космические лучи в Галактике и метагалактике

Из бескрайних просторов Галактики к нам приходят сигналы только от электронов и позитронов, входящих в состав космических лучей.

Каким же способом можно получить сигналы от невидимых объектов на расстояниях в тысячи и миллионы световых лет? До 1950—1953 гг. это казалось невозможным, и только развитие радиоастрономии позволило судить о космических лучах в Галактике и за ее пределами.

---

[4] Уже после написания этой статьи стало известно (см. «Phys. Rev. Letters», 1961, № 3), что при помощи аппаратуры, установленной на шарах-зондах, поднимавшихся до такой высоты, масса воздуха над которой составляла всего 4,5 *г/см*², удалось показать, что в первичных космических лучах число электронов составляет $(3 \pm 1)\%$ общего числа частиц.

Все космическое радиоизлучение можно разделить на тепловое и нетепловое. Основная часть нетеплового излучения связана с ускорением сверхбыстрых (релятивистских) электронов в магнитных полях Галактики. Так как напряженность этих полей около 10^{-5} *гаусс*, то, оказывается, ускорение электронов с энергией около 10^9 *эв* даст излучение на метровых волнах. Для более тяжелых частиц такое излучение несравненно меньше и почти незаметно на фоне электронного излучения. Но по энергетическому спектру радиоизлучения электронов мы можем судить и о распределении по энергиям протонной и ядерной компонент космических лучей. Измеряя спектр радиоизлучения, можно узнать распределение космических лучей по энергиям и, зная величину магнитного поля, определить их количество. По поляризации магнитнотормозного излучения можно судить и о направлении магнитных полей.

Вместе с излучением нейтрального водорода на волне 21 *см* это дает возможность существенно дополнить картину строения нашей Галактики.

Радиоастрономическая картина Галактики

По обычному астрономическому представлению, наша Галактика состоит из плоского диска, имеющего спиральную структуру, и сферической части. Толщина диска 1—2 тыс. и диаметр около 100 тыс. световых лет. Радиус сферической части составляет около 3÷5 тыс. световых лет.

Совершенно иную картину дают радиоастрономические наблюдения (рис. 1). 80—90% всего космического радиоизлучения приходит от галактического «гало» (или «короны»), имеющего почти сферическую форму радиусом 30÷50 тыс. световых лет ($3 \div 5 \cdot 10^{22}$ *см*) и состоящего в основном из ионизированного водорода со средней плотностью 1 атом на 100 *см*^{3}. Объем гало $1 \div 5 \cdot 10^{68}$ *см*^{3}.

Радиодиск Галактики, интенсивность излучения которого на единицу объема значительно выше, чем у гало, существенно толще. Полный вклад его в космическое радиоизлучение гораздо меньше, чем у гало, из-за значительно меньшего объема. Здесь плотность ионизированного водорода — около одной частицы в кубическом сантиметре. И, наконец, в середине Галактики существует

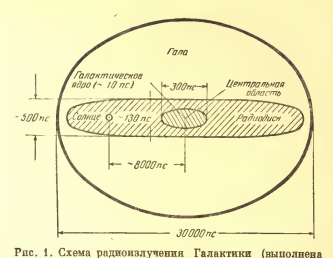


Рис. 1. Схема радиоизлучения Галактики (выполнена не в масштабе). Размеры в парсеках (*пс*) (1 *пс* $\approx 3 \cdot 10^{18}$ *см*, или 3,25 световых лет; 1 световой год $\approx 9{,}5 \cdot 10^{17}$ *см*)

радиообласть, окружающая галактический центр, размером 400 на 900 световых лет.

Эта область погружена в «густое» (1÷2 *атом/см*^{3}) облако нейтрального водорода размером 300÷400 на 2÷2,5 тыс. световых лет. Концентрация звезд в этом облаке тоже очень велика — в 500÷1000 раз больше, чем в окрестности Солнца. Вся эта масса «быстро» вращается вокруг галактического центра (за 30 тыс. лет эта масса делает на расстоянии 300 световых лет от центра один оборот, в то время как наше Солнце совершает один оборот вокруг центра Галактики за 200 миллионов лет). В самом же центре находится галактическое ядро размером около 30 световых лет, содержащее ионизированный водород с концентрацией до 1000 протонов в кубическом сантиметре! Такое же ядро обнаружено и в некоторых других галактиках, например в туманности Андромеды. Эти ядра оказываются очень яркими в оптических лучах, но ядро нашей Галактики с Земли мы увидеть не можем из-за поглощения света межзвездной средой.

На радиокарте Галактики (рис. 2), полученной по измерениям на волне 21 *см*, видно, что спиральная структура начинается на расстоянии 10 тыс. световых лет от

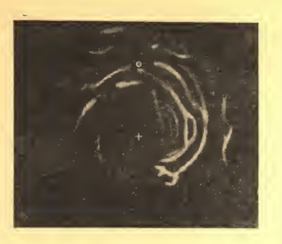


Рис. 2. Радиокарта Галактики
+ — центр Галактики; ⊙ — солнечная система

центра. Можно предположить, что эти «рукава» образовались под действием магнитного поля. Галактика совершает один оборот, как мы уже сказали, в среднем за 200 миллионов лет. Следовательно, за время своего существования (примерно 10 миллиардов лет) она совершила около 50 оборотов. Отсюда следует, что спиральные рукава многократно «рвались» (это и видно на рис. 2), и, таким образом, они не служат магнитной ловушкой для космических лучей.

Мощными источниками радиоизлучения являются оболочки сверхновых звезд. Если бы мы могли видеть своими глазами радиоизлучение, то увидели бы на небе три почти равных по яркости объекта: Солнце, туманность Кассиопея А и источник Лебедь А. Несколько уступала бы им по яркости Крабовидная туманность. Туманность Кассиопея А — это разлетающаяся со скоростью до 8000 *км/сек* газовая оболочка сверхновой звезды, вспыхнувшей, по последним оценкам, около 256 лет назад [5].

---

[5] Вспышка не отмечена астрономами того времени, так как она могла быть не видна из-за поглощения света в межзвездной среде.

Вспышка сверхновой, разлетающаяся оболочка которой называется Крабовидной туманностью, была отмечена в старинных летописях в 1054 г.[6] И наконец, Лебедь А — это одна из далеких галактик.

Происхождение космических лучей

Большинство исследователей придерживается сейчас мнения, что космические лучи образуются в основном в пределах нашей Галактики, а не приходят в нее извне. Во всяком случае, это справедливо для частиц с энергией меньше 10^{17} *эв* на один нуклон.

Где же в основном генерируются в Галактике космические лучи? Попробуем разобраться в этом вопросе.

Для поддержания примерно равновесного количества космических лучей в Галактике должны непрерывно генерироваться космические лучи с общей энергией $10^{39} \div 10^{40}$ *эрг/сек*. Наше Солнце, обычная стационарная звезда, тратит на испускание космических лучей $10^{21} \div 10^{22}$ *эрг/сек*. Если считать, что более ста миллиардов звезд Галактики излучают столько же, то и тогда получаемая энергия будет в $1 \div 10$ миллионов раз меньше требуемой. Однако в числе стационарных звезд есть около миллиарда так называемых магнитных звезд, активность которых, как источника космических лучей, может превосходить солнечную, по наивысшим оценкам, в миллион раз. Но и в этом случае будет произведено всего около $0,1 \div 1\%$ требуемой мощности.

Число нестационарных звезд значительно меньше, чем стационарных. Подробное рассмотрение показывает, что, хотя активность их гораздо выше, но и они могут внести в создание космических лучей вклад, не превышающий $0,1 \div 1\%$.

По-видимому, основной источник космических лучей — сверхновые и, возможно, новые звезды. Такова точка зрения В. Л. Гинзбурга, И. С. Шкловского и ряда других исследователей, занимающихся этим вопросом.

---

[6] Крабовидная туманность находится от нас на расстоянии около 4500 световых лет. Это означает, что вспышка, наблюдавшаяся 900 лет назад, произошла около 3600 года до нашей эры.

Взрывающиеся звезды и галактики

Примерно раз в 40—70 лет в Галактике ослепительно вспыхивает сверхновая звезда. Конечно, с Земли мы видим далеко не все вспышки — большая их часть заслоняется от нас непрозрачным межзвездным веществом диска Галактики. Несколько недель сверхновая светит настолько ярко, что мощность излучения ее в несколько миллиардов раз больше мощности излучения Солнца.

Но недолго продолжается «оптическая жизнь» сверхновой. Свет ее быстро ослабевает, и уже через несколько месяцев звезда становится, при современной астрономической технике, оптически ненаблюдаемой. Заметим, что это справедливо лишь в отношении далеких звезд. Но огромные массы газа, образующиеся в момент вспышки, разлетаются в пространстве и, пока они не рассеются полностью в межзвездной среде, могут наблюдаться оптически и радиоастрономически в течение 10—100 тыс. лет. Это означает, что в нашей Галактике должно быть одновременно, во всяком случае, несколько сот следов сверхновых звезд. Между тем астрономами зарегистрировано значительно меньше. Это объясняется тем, что большинство сверхновых образуется в плоскости галактического диска, т. е. как раз там, где межзвездная среда больше всего мешает наблюдению.

Причины появления сверхновых пока не установлены. Существует, например, теория, что сверхновая — это звезда, которая в процессе своей эволюции пришла в такое состояние, что в ее центральной области почти все протоны и электроны мгновенно образовали нейтроны! Происходит чудовищное сжатие, и звезда быстро уменьшается в размерах («нейтронный коллапс»), взрывается за счет выделяющейся гравитационной энергии, и вещество наружных областей разбрасывается в пространство. По другой гипотезе, после истощения ядерного горючего в центральной зоне ядро звезды начинает быстро сжиматься, а «падающие» на него внешние слои разогреваются до температуры воспламенения оставшегося в них ядерного горючего.

Взрыв сверхновой грандиозен. Полная энергия, выделившаяся, например, в туманности Кассиопея А, находящейся от Земли на расстоянии 10 тыс. световых лет, около $10^{51} \div 10^{52}$ *эрг*! Это в сто миллиардов раз больше,

чем излучает Солнце за год. Есть основание полагать, что около одной десятой этого количества пошло на образование космических лучей. Такое «впрыскивание» могло бы компенсировать потери энергии всей совокупности космических лучей в Галактике в течение 3÷30 тыс. лет. Большинство сверхновых обладает значительно меньшей энергией взрыва, но даже в сто раз меньшей средней энергии хватило бы на поддержание приблизительно стационарного состояния космических лучей с общей энергией на галактику в $10^{56} \div 10^{57}$ *эрг*. А именно такие значения и приходятся на одну галактику, по данным радиоастрономии.

Однако встречаются и исключения. Галактика Лебедь А, находящаяся на расстоянии 700 млн. световых лет (до ближайшей галактики Андромеды около 1,5 млн. световых лет), обладает примерно в 100 тыс. раз большей энергией космических лучей (10^{61} *эрг*), чем нормальная галактика. По приходящему от нее на Землю радиоизлучению она уступает только Солнцу в Кассиопее. Естественно, что она была сначала открыта радиоастрономическими средствами и только потом ее удалось обнаружить и оптически.

Одно время считали, что здесь мы имеем дело с двумя сталкивающимися галактиками, но сейчас от этого предположения отказались. Расстояние между галактиками велико по сравнению с их размерами, и вероятность такого столкновения очень мала.

Лебедь А имеет приблизительно такую форму: в центре два светлых вытянутых пятна с темной средней полосой; их размер около 8 тыс. световых лет. По сторонам — две огромные сферические области радиоизлучения на расстоянии 130 тыс. световых лет от средней темной полосы.

Туманность Центавр А, расположенная ближе к нам, имеет такой же вид, но только сферы радиоизлучения в несколько раз больше (до 650 тыс. световых лет). Естественно предположить, что это одинаковые по типу объекты, но на разных этапах развития. Галактики как бы взрываются, выбрасывая гигантские потоки газа и космических лучей. Но если для взрыва сверхновых звезд мы можем предположить тот или иной механизм процесса, то совершенно неясно, в чем может заключаться «спусковой механизм», вызывающий взрыв галактики.

Возможно, что в этих галактиках в настоящее время происходит бурное звездообразование.

Заметим, что как бы интенсивно ни испускали внегалактические источники космические лучи, в балансе нашей Галактики внегалактические частицы практически, по-видимому, не играют никакой роли. Только если бы частицы с энергией $10^{18} \div 10^{19}$ *эв* оказались не тяжелыми ядрами, а протонами, можно было бы говорить об их поступлении в Галактику извне.

Космический ускоритель

Итак, возможный источник космических лучей найден. Но ведь скорость газов разлетающейся оболочки сверхновой звезды не превосходит нескольких тысяч километров в секунду. Это во много раз меньше, чем скорость космических лучей, близкая к скорости света, и энергии космических частиц в миллионы и миллиарды раз превышают энергии частиц разлетающейся оболочки.

Каков же тот гигантский ускоритель, который способен придать космическим частицам такие огромные энергии?

Прежде всего, ускорение может иногда происходить и в самой газовой оболочке. Если по газовой оболочке будет проходить очень сильная ударная волна, то в условиях убывающей плотности газа от центра к периферии скорость волны будет возрастать. Она становится сравнимой со скоростью света, начиная от плотности ~ 10 *г/см*^{3}, и весь вышележащий слой вещества превращается в космические лучи. Когда волна доходит до области с плотностью около одной десятимиллионной *г/см*^{3}, можно получить частицы с энергией до 10^{17} *эв/нуклон*. А это дает почти весь набор энергий, который мы наблюдаем в космических лучах.

Однако есть возражения против возможности такого механизма ускорения. Можно полагать, что при таком процессе максимальная возможная энергия частиц должна быть в десятки и сотни тысяч раз меньше указанной.

Но, во всяком случае, нет возражений против того, что именно ударные волны могут «впрыскивать» в простран-

ство частицы довольно высокой энергии, которые получают дальнейшее ускорение уже другими путями.

Наиболее вероятен тот же механизм, который используется для ускорения частиц в лаборатории,— воздействие на заряженные частицы электромагнитными полями.

Прежде всего, играет роль так называемое бетатронное ускорение, т. е. ускорение частицы в увеличивающемся со временем магнитном поле. Если частица вылетит из области увеличивающегося поля раньше, чем оно начнет уменьшаться, то она унесет некоторое добавочное количество энергии.

Кроме того, частицы могут ускоряться, сталкиваясь с быстродвижущимися сгустками магнитных полей. При таком столкновении часть энергии, в среднем, будет переходить от магнитного поля к частице. Расчет показывает, что при таком механизме частицы могут набрать энергию до 10^{17} *эв/нуклон*.

Если первый из этих двух путей может дать более быстрое, но ограниченное по величине ускорение, то второй, более медленный, так называемый статистический механизм ускорения может действовать в течение всего времени жизни частицы.

Но почему среди космических частиц гораздо больше процент тяжелых ядер, чем во вселенной? Связано ли это с механизмом ускорения или с тем, что в сверхновых звездах образуется сравнительно больше тяжелых ядер, чем обычно содержится в звездах?

Некоторые сравнительно сложные соображения приводят к выводу, что основную роль здесь играет механизм ускорения, особенно на начальных стадиях. Можно полагать, что более тяжелые частицы будут ускоряться без инжекции, т. е. независимо от их начальной энергии, тогда как для более легких частиц существует «порог инжекции», т. е. некоторая начальная энергия, которой обладают далеко не все легкие частицы. Именно поэтому их относительное число в космических лучах заметно снижается. Наличие вблизи Земли заметного числа атомов лития, бериллия и бора, во много раз превосходящего их количество во вселенной, связано с расщеплением более тяжелых ядер при столкновениях с атомами межзвездной среды.

Время жизни космических частиц

Один из важных факторов, характеризующих космические лучи в Галактике, это время их жизни. Как же кончается их жизнь в Галактике? Во-первых, они могут вылететь из Галактики и, во-вторых, столкнувшись с ядрами атомов межзвездного газа, они могут потерять свою скорость, т. е. перестать быть тем, что мы называем космическими лучами.

Средняя плотность частиц в Галактике может быть определена простым делением всей массы газа в ней на общий объем. Масса нейтрального водорода близ плоскости Галактики $2{,}8 \cdot 10^{42}$. Принимая, что межзвездный газ состоит из 93% водорода и 7% гелия, и добавляя массу газа в гало, получаем среднюю плотность

$$\frac{3{,}6 \cdot 10^{42}}{1 \div 5 \cdot 10^{68}} = 7 \cdot 10^{-27} \div 3 \cdot 10^{-26} \ г/см^3,$$

что соответствует 3—15 частицам на 1000 $см^3$. Наиболее обоснованной сейчас представляется средняя концентрация межзвездного газа в одну частицу на 100 $см^3$. При такой концентрации и скорости космических частиц, почти равной скорости света, можно определить время до столкновения разных космических частиц с межзвездным газом.

Протоны (водород)	3800	млн.	лет
α-частицы (гелий)	940	»	»
Ядра с атомным номером 3—5 . . .	510	»	»
Ядра с атомным номером 6—9 . . .	360	»	»
Ядра с атомным номером больше 10	250	»	»
Ядра железа	140	»	»

Как видно из таблицы, эти времена значительно меньше времени существования Галактики, которое, по современным оценкам, порядка десяти миллиардов лет. Следовательно, все существующие сейчас космические лучи образовались не одновременно с Галактикой, а в течение ее жизни.

Выходят ли космические лучи за пределы Галактики? Ответ на этот вопрос зависит от того, какую конфигурацию имеют магнитные поля Галактики и каковы условия на ее границе. Если принять, что все магнитные силовые линии замыкаются в Галактике (это называется «закрытой моделью»), то выхода частиц в межгалактическое

пространство почти совсем не будет. Космические лучи, движение которых в основном определяется магнитными полями, будут как бы отбрасываться от границ Галактики. Однако есть некоторые данные о том, что в действительности существует не «закрытая», а «открытая» модель Галактики, т. е. часть магнитных силовых линий уходит в межгалактическое пространство (напряженность магнитного поля в нем в среднем в 100 раз меньше, чем в Галактике). Но путь, который внутри Галактики должно проделать подавляющее большинство частиц, настолько длинен и сложен, что на преодоление его уходит значительно больше времени, чем приведенное время жизни различных космических частиц. Таким образом, в любом случае, даже при отсутствии отражений от границ, космические лучи сравнительно медленно покидают галактическую систему. Следовательно, выход космических лучей мало отражается на их времени жизни, которое определяется приведенными значениями.

* * *

За сотни миллионов лет своей жизни космическая частица, несущаяся со скоростью, весьма близкой к скорости света, проделывает грандиозный путь, по своей длине во много раз превосходящий диаметр Галактики. Фотоны и нейтрино, движущиеся со скоростью света, пересекают Галактику лишь один раз и, выходя за ее пределы, исчезают в безбрежном пространстве вселенной. А космические лучи, эти подлинные галактические скитальцы, сотни раз успевают побывать и в далеких и в близких уголках Галактики. Согласно оценкам, общее количество космических частиц, находящихся в настоящее время в Галактике, составляет $10^{58} \div 10^{59}$. Общая энергия их настолько велика, что ее можно принять равной полной энергии магнитных полей Галактики. Вопрос о происхождении и химическом составе космических лучей тесно переплетается с вопросами эволюции звезд и самой Галактики. Чисто качественный подход сменяется более обоснованными теоретическими суждениями, основанными на огромном материале радиоастрономических наблюдений.

Дальнейшее исследование космических лучей может дать ключ к решению важнейших астрофизических проблем и вопросов происхождения и эволюции вселенной.

Парамагнитный резонанс*

Доктор физико-математических наук
С. А. Альтшулер

В 1944 г. в Казани советским ученым Е. К. Завойским было открыто явление, получившее название парамагнитного резонанса. Это открытие привлекло внимание многих физиков, занявшихся изучением различных сторон нового эффекта. За короткое время было опубликовано несколько сот научных работ, посвященных парамагнитному резонансу. Вскоре после работ Завойского был открыт ряд родственных явлений; в результате создалось большое научное направление, часто объединяемое названием «магнитный резонанс» или «магнитная радиоспектроскопия». Многочисленные приложения в различных областях физики, химии и даже биологии, ряд технических применений в современной электронике — все это с каждым днем расширяет круг лиц, интересующихся этой областью физики. Но прежде чем говорить о природе парамагнитного резонанса, рассмотрим, что такое парамагнетизм и как ведут себя атомы различных веществ в магнитном поле.

Магнитные свойства атомов

Магнитные свойства атомов определяются вращательным движением электронов. Движущийся электрический заряд создает магнитное поле. Поэтому атом, содержащий вращающиеся вокруг ядра электроны, подо-

* «Природа», 1957, № 2.

бен маленькому магнитику. Направление и величина намагничения атома характеризуются его магнитным моментом. Если электрон вращается вокруг некоторой оси, то связанный с этим движением магнитный момент M направлен по оси вращения, а величина его пропорциональна средней скорости движения v и среднему радиусу орбиты r (рис. 1). Но этим же величинам v и r пропорционален момент вращения (механический момент атома), который в простейшем случае равен $K = mvr$, где m — масса электрона. Понятно, что между магнитным и механическим моментом должна существовать связь. Классическая электродинамика показывает, что эта связь выражается простой формулой $M = \gamma_e K$. Величина γ_e называется гиромагнитным отношением, оно равно $e/2\,mc$; здесь e — заряд электрона, c — скорость света. Если атом содержит несколько электронов, то их моменты складываются как векторы. При этом классическое значение гиромагнитного отношения для всей электронной оболочки атома будет по-прежнему равно γ_e.

Рис. 1. Магнитный момент электрона направлен по оси вращения

Может случиться, что сумма магнитных моментов всех электронов атома окажется равной нулю; такой атом называется диамагнитным. Диамагнитными являются, например, атомы инертных газов. Если результирующий момент атома отличен от нуля, то атом называется парамагнитным. Парамагнитным является, например, атом водорода.

Выясним теперь, что произойдет с атомом, если его поместить между полюсами магнита.

Магнитное поле действует на движущийся электрон с силой, ориентированной под прямым углом к направлению его движения. Поэтому траектория прямолинейно движущегося электрона в магнитном поле искривляется. Можно рассчитать, как изменится движение электронов, вращающихся вокруг атомного ядра, под влиянием магнитного поля напряженности H. Английский физик Лар-

мор показал, что на первоначальное движение электронов накладывается вращательное движение вокруг оси, параллельной магнитному полю и проходящей через ядро. Частота этого вращения равна $\nu_0 = \frac{1}{2\pi}\gamma_e H$ и называется частотой Лармора.

Мы знаем, что вращательное движение электронов приводит к намагничиванию атома, следовательно, атом, помещенный в магнитное поле, должен приобрести дополнительный магнитный момент. Этот созданный магнитным полем атомный магнитный момент будет направлен противоположно полю [1].

Магнитные свойства парамагнитного атома определяются, как мы знаем, его магнитным моментом. Что случится с моментом такого атома при его внесении в магнитное поле? Так как при этом все электроны начнут вращаться вокруг магнитного поля с одной и той же частотой Лармора, то первоначальный момент атома начнет, очевидно, прецессировать вокруг магнитного поля с той же частотой. Это явление аналогично прецессии волчка, вращающегося на гладкой горизонтальной поверхности (рис. 2). Действительно, под действием силы тяготения волчок при малейшем отклонении его оси от вертикального положения упал бы, если бы он не вращался. При вращении же возникает прецессия вокруг вертикальной оси, проходящей через его основание. Магнитное поле действует на парамагнитный атом с силой, которая стремится повернуть атом так, чтобы его магнитный момент стал параллелен полю. Но так как атом подобен волчку, то угол между магнитным моментом и полем не изменится; вектор момента начнет вращаться вокруг направления поля.

Внесение парамагнитного атома в магнитное поле приводит к изменению его энергии. Будем изменять угол между моментом атома и направлением магнитного поля. Если момент и поле параллельны друг другу, то

---

[1] То, что дополнительный, индуцированный магнитный момент действительно должен быть ориентирован против поля, легко понять, если вспомнить правило Ленца о направлении индукционного тока, возникающего в контуре при его внесении в магнитном поле. Индукционный ток должен иметь такое направление, при котором порождаемое им магнитное поле будет направлено против первоначального.

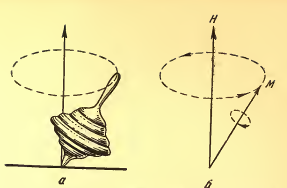


Рис. 2. Прецессия волчка вокруг вертикальной оси (*а*); прецессия магнитного момента *M* вокруг магнитного поля *H* (*б*)

прецессионное движение будет совершаться в направлении, противоположном вращательному движению, связанному с первоначальным магнитным моментом атома (ведь наведенный магнитный момент, образующийся благодаря прецессии Лармора, направлен против поля!). Поэтому в данном случае магнитное поле вызывает уменьшение кинетической энергии электронов. Наоборот, если магнитный момент антипараллелен магнитному полю, то ларморова прецессия в общем усилит первоначальное вращательное движение электронов. Таким образом, при изменении угла между магнитным моментом и полем от нуля до 180° кинетическая энергия электронов изменяется от минимальной величины до максимальной.

Из механики известно, что из различных возможных состояний системы наиболее устойчивым будет состояние с минимальной энергией. Поэтому устойчивым состоянием парамагнитного атома во внешнем магнитном поле будет такое, когда атомный момент параллелен полю.

До сих пор мы пользовались классическими представлениями. Между тем движение электронов в атомах определяется законами квантовой механики. Поэтому попытки классической физики объяснить магнитные свойства атомов оказались неудачными. Современное учение о магнетизме полностью основывается на квантовой теории. Классические представления могут дать наглядную картину явления, но эта картина справедлива лишь в ограниченных пределах.

Одним из наиболее важных следствий квантовой механики является дискретность многих физических величин. Так, энергия атома может принимать только некоторые определенные значения; поэтому очень удобно говорить об уровнях энергии. Атому каждого элемента соответствует своя система энергетических уровней. Под влиянием внешних воздействий, например приложенного извне магнитного поля, энергия атома меняется. На языке квантовой теории это означает, что каждый энергетический уровень «расщепляется» внешним полем на несколько подуровней. Ряд возможных значений энергии атома становится более многочисленным.

Для теории магнетизма важны следующие выводы квантовой механики.

1) Механический и магнитный моменты являются квантованными величинами. Если за единицу механического момента K принять $h/2\pi$ ($h = 6{,}625 \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек* — постоянная Планка), то момент вращения будет всегда выражаться целым числом.

Так как $M = \gamma_e K$, то и магнитный момент будет характеризоваться целым числом, если за единицу принять величину $\beta = eh/4\pi mc$, называемую магнетоном Бора.

2) Существует пространственное квантование. Это значит, что пространственная ориентация механического (а следовательно, и магнитного) момента атома не может быть произвольной. Механический момент может быть ориентирован только так, чтобы его проекция на направление приложенного поля, выраженная в тех же атомных единицах $h/2\pi$, была целым положительным или отрицательным числом. Как видно из рис. 3, если полный момент равен, например, двум атомным единицам, то таких ориентаций может быть пять.

Так как изменение энергии атома под действием внешнего магнитного поля зависит от ориентации магнитного момента, то ясно, что при включении внешнего магнитного поля исходный энергетический уровень атома расщепится на ряд подуровней, число которых равно числу возможных ориентаций атомного момента. Эти подуровни отделены одинаковыми интервалами, равными $g\beta H$. Ниже мы поясним физический смысл множителя g, называемого g-фактором. Соответственно пяти возможным ориентациям атомного момента для приведенного на рис. 3

примера мы теперь имеем пять равноотстоящих друг от друга уровней энергии (рис. 4).

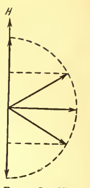


Рис. 3. Пространственное квантование. Пять возможных ориентаций момента, равного двум атомным единицам

3) Электроны не только обращаются вокруг атомных ядер, но обладают собственным вращательным движением. Совокупность механических и магнитных свойств, связанных с этим вращением, называют «спин». Гиромагнитное отношение для спиновых моментов вдвое больше, чем для орбитального движения; магнитный спиновый момент электрона равен одному магнетону Бора.

4) Магнитный момент всего атома складывается из орбитальных и спиновых моментов электронов. Атом будет парамагнитен, если этот суммарный момент отличен от нуля. Этот момент будет прецессировать вокруг направления магнитного поля H с частотой

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi}\gamma H.$$

Каково же гиромагнитное отношение γ для всей электронной оболочки атома? Для чисто орбитального движения, как мы знаем, $\gamma_c = e/2\,mc$, для спинового движения это отношение вдвое больше, т. е. $\gamma_s = e/mc$. В общем случае, для всей электронной оболочки атома, обладающей и орбитальным и спиновым моментами, $\gamma = ge/2mc$, где множитель g и есть g-фактор, о котором шла речь выше. Численное значение g-фактора зависит и от вклада, вносимого орбитальным и спиновым моментами.

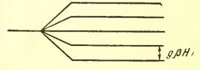


Рис. 4. Расщепление уровня энергии атома в магнитном поле, если момент равен двум атомным единицам. Интервалы между подуровнями одинаковы

Частота прецессии Лармора, таким образом, определяется равенством

$$\nu_0 = g\,\frac{eH}{4\pi mc}.$$

Если подставить численные значения констант e, c, m, то получится $\nu_0 = 1{,}4 \cdot 10^6\ gH$ *гц*.

Важно заметить, что в практически легко достижимых полях до 10 000 *эрстед* частота ν_0 лежит в радиочастотном диапазоне.

Природа парамагнетизма

Хорошо известно, что образец любого вещества, поднесенный к магниту, притягивается или отталкивается. Это действие магнитного поля сказывается очень сильно, если вещество относится к классу ферромагнетиков (железо, кобальт, никель, гадолиний, некоторые сплавы металлов), в огромном же большинстве вещества являются слабомагнитными. Слабомагнитные вещества можно подразделить на два класса: диамагнетики и парамагнетики. Первые выталкиваются из неоднородного магнитного поля, вторые втягиваются в него.

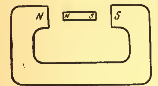


Рис. 5. Диамагнетик намагничивается в направлении, противоположном магнитному полю

Какова природа этих явлений?

На природе ферромагнетизма мы не будем останавливаться. Неферромагнитное тело в отсутствие внешнего магнитного поля всегда не намагничено. Это объясняется тем, что благодаря хаотическому распределению магнитных моментов отдельных атомов (или молекул) суммарный момент всего тела будет равен нулю. Если поместить тело между полюсами магнита, то возникает ларморовская прецессия атомных электронных оболочек вокруг направления магнитного поля. При этом все тело намагнитится в направлении, противоположном полю (рис. 5). Этот «диамагнитный» эффект универсален: он присущ всем телам. Если тело состоит из диамагнитных атомов, то действие магнитного поля ограничится указанным эффектом. Если же тело содержит большое число парамагнитных атомов, то диамагнитный эффект полностью будет замаскирован другим, гораздо бóльшим парамагнитным эффектом. Магнитные моменты изолированных атомов, помещенных в магнитном поле, как мы видели, будут прецессировать так, что углы наклона их к полю не изменятся. Вследствие этого первоначальное хаотическое распределение моментов сохранится.

В действительности атомы любого тела не изолированы, они взаимодействуют друг с другом.

Поясним, как скажется взаимодействие атомов на намагничении, на примере волчка, вращающегося на гладкой горизонтальной поверхности. Почему волчок в конце концов падает? Любая поверхность не является абсолютно гладкой; благодаря трению кинетическая энергия вращательного движения постепенно перейдет в тепло, волчок затормозится и, наконец, упадет, приняв устойчивое положение.

Устойчивым положением парамагнитного атома в магнитном поле будет такое, когда его магнитный момент направлен параллельно полю. Благодаря взаимодействию парамагнитного атома с другими частицами возможен переход кинетической энергии его прецессионного движения в тепло. При этом угол между магнитным моментом и направлением поля будет уменьшаться. Выстраиванию моментов всех атомов по полю будет препятствовать тепловое движение. В конце концов установится некоторое «статистическое равновесие», соответствующее температуре парамагнетика. Чем ниже температура тела, тем упорядоченнее будет ориентация атомов. При достаточно низкой температуре суммарный магнитный момент всех атомов будет направлен по полю; это значит, что тело будет намагничено в направлении поля (рис. 6).

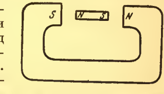


Рис. 6. Парамагнетик намагничивается в направлении магнитного поля

Намагничение парамагнетиков происходит не мгновенно после включения поля, а в течение короткого промежутка времени, называемого временем парамагнитной релаксации. Величина времени релаксации зависит от того, насколько велики взаимодействия между атомами, приводящие к переходу энергии прецессионного движения атомов в тепло. Для твердых тел, магнитные свойства которых большей частью определяются спинами электронов, а тепловое движение представляет собой колебания атомов кристаллической решетки, взаимодействия, вызывающие обмен энергией между спинами и колебаниями решетки, называются спин-решеточными.

С понижением температуры спин-решеточное взаимодействие ослабевает, и, следовательно, время релаксации растет.

Согласно квантовым представлениям, процесс намагничения парамагнетика заключается в следующем. В момент включения магнитного поля атомы равномерно распределяются по образующимся энергетическим уровням, и поэтому суммарный магнитный момент равен нулю. Под влиянием колебаний кристаллической решетки парамагнитные атомы будут переходить преимущественно с верхних уровней на нижние. При этом общая магнитная энергия атомов уменьшится, а интенсивность тепловых колебаний возрастет. После установления теплового равновесия нижние энергетические уровни будут заселены гуще верхних, и, следовательно, магнитные моменты атомов будут направлены преимущественно вдоль магнитного поля.

Мы рассмотрели самые общие черты парамагнетизма. Конкретные свойства различных парамагнетиков весьма разнообразны и тесно связаны со строением вещества.

Большинство газов в нормальном состоянии диамагнитно, ибо магнитные моменты атомов, образующих молекулу, как правило, компенсируют друг друга. К парамагнетикам относятся многие металлы, ибо электроны проводимости всегда являются носителями парамагнетизма. Среди твердых диэлектриков наиболее хорошо изучены магнитные свойства гидратированных солей элементов группы железа и редких земель. У этих веществ связь между атомами, образующими кристаллическую решетку, носит ионный характер. Носителями магнетизма в этих солях являются ионы металлов (Ti, V, Cr, Mn, Ce, Pr и др.). Среди парамагнитных жидкостей лучше всего исследованы растворы парамагнитных солей.

Парамагнитный резонанс

После рассмотрения общих свойств парамагнетиков вернемся к непосредственно интересующему нас явлению парамагнитного резонанса. Заключается оно в следующем. Парамагнетик помещается одновременно в два взаимно-перпендикулярных магнитных поля. Одно из них — статическое, другое — переменное, обычно радиочастотное. Пусть напряженность статического поля много больше амплитуды напряженности радиочастотного

поля. Если частота переменного поля оказывается равной частоте ларморовой прецессии парамагнитных частиц (атомов, молекул), то наблюдается сильное поглощение энергии переменного поля. Название «парамагнитный резонанс» хорошо передает суть явления, ибо главное заключается в резонансе между колебаниями переменного магнитного поля и прецессионным движением моментов парамагнитных частиц.

Рассмотрим подробнее механизм этого явления.

Прежде всего дадим классическую картину парамагнитного резонанса.

Предположим, что парамагнитный атом находится в сильном статическом поле напряженности H. Как мы знаем, магнитный момент атома будет прецессировать вокруг поля H с частотой Лармора $\nu_0 = geH/4\pi mc$. Допустим, что на атом наложено, кроме того, слабое магнитное поле напряженности H_1, лежащее в плоскости, перпендикулярной к полю H, и вращающееся с частотой ν (рис. 7).

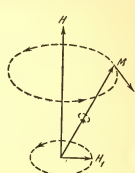


Рис. 7. Классическая картина магнитного резонанса. Под влиянием поля H_1, вращающегося с частотой ларморовой прецессии, угол между H и M увеличивается

Если частоты ν и ν_0 совпадают, то векторы M и H_1 вращаются вместе, и по отношению друг к другу они неподвижны. Мы знаем, что магнитное поле действует на магнитную частицу с силой, стремящейся расположить магнитный момент по полю. Значит, поле H_1 будет все время стремиться увеличить угол между вектором M и статическим полем H. Совсем по-другому будет обстоять дело, если частоты ν и ν_0 не совпадают. Теперь относительное расположение векторов M и H_1 будет непрерывно меняться, и поэтому поле H_1 будет то увеличивать, то уменьшать угол между моментом M и направлением статического поля H. В среднем влияние поля H_1 на движение электронов атома будет равно нулю. Таким образом, только в условиях резонанса, когда $\nu = \nu_0$, действие слабого переменного поля накапливается и становится значительным.

На практике вместо вращающегося поля обычно применяют переменное синусоидальное поле. Ведь осциллирующее движение по прямой можно представить в виде суммы двух вращательных движений, имеющих противоположные фазы. Но поле, движущееся противоположно направлению прецессии атома, никакого заметного влияния не окажет, если даже $\nu = \nu_0$, ибо суммарное действие этого поля будет в среднем равно нулю.

Если вместо системы изолированных атомов мы возьмем реальный парамагнетик, то необходимо будет учесть спин-решеточное взаимодействие. Переменное поле, отклоняя атом все дальше от положения устойчивого равновесия, увеличивает энергию парамагнитной частицы. Спин-решеточное взаимодействие переводит эту энергию в тепловое движение, возвращая тем самым атом в первоначальное положение. Таким образом, парамагнетик в условиях резонанса будет непрерывно и в значительных количествах поглощать энергию переменного магнитного поля. В этом и заключается явление парамагнитного резонанса.

Обратимся теперь к квантовой картине явления. Для этого вспомним сначала, как квантовая теория объясняет процессы излучения и поглощения света. Пусть в атоме имеется два каких-нибудь энергетических уровня. Переход атома с верхнего энергетического уровня на нижний будет сопровождаться излучением одного светового кванта с энергией $h\nu$. Наоборот, если атом находится в нижнем энергетическом состоянии, то при освещении возможен переход в верхнее энергетическое состояние с поглощением кванта света. Такой процесс возможен, однако, только в том случае, если свет имеет подходящую частоту; нужно, чтобы энергия светового кванта $h\nu$ равнялась интервалу между энергетическими уровнями. Радиоволны и световые волны имеют одинаковую электромагнитную природу, поэтому принципиальная разница между оптикой и радиоспектроскопией отсутствует. Парамагнитный резонанс может быть объяснен квантовыми переходами под влиянием радиочастотного поля между магнитными уровнями энергии атомов. Как и в оптике, такой переход будет иметь место при облучении парамагнетика радиочастотным излучением с частотой ν только при равенстве энергии кванта $h\nu$ интервалу между соседними энергетическими подуровнями $g\beta H$. Мы получаем,

таким образом, прежнее условие резонанса $h\nu = g\beta H$ или, что то же, $\nu = \nu_0$, ибо $\beta = \frac{eh}{4\pi mc}$.

Радиочастотное поле в условиях резонанса будет перебрасывать атомы преимущественно с нижних уровней энергии на верхние. Энергия частиц будет расти. Спин-решеточное взаимодействие будет превращать эту энергию в тепло, вызывая обратные переходы с верхних энергетических уровней на нижние. В результате установится некоторое динамическое равновесие. Энергия радиочастотного поля будет непрерывно превращаться в тепло. В оптике большей частью изучаются спектры излучения, обязанные переходам с верхних квантовых уровней на нижние. В явлении парамагнитного резонанса рассматриваются линии поглощения радиочастотного излучения, возникающие в результате переходов атомов с нижних уровней энергии на верхние.

Как наблюдают парамагнитный резонанс

Экспериментальная установка для наблюдения парамагнитного резонанса состоит из радиотехнической аппаратуры и электромагнита, который служит для создания однородного магнитного поля, вызывающего прецессию атомных моментов. Современные электромагниты позволяют легко получать поля напряженностью до 20 000 *эрстед*. В таких полях частота прецессии достигает приблизительно 10^{11} *гц*, т. е. относится к области радиочастот, что очень удобно, так как позволяет в качестве источника переменного магнитного поля использовать радиочастотный генератор. Применение радиоаппаратуры обеспечивает получение установок с исключительно высокой чувствительностью.

Принципиальная схема микроволновой установки, обычно называемой радиоспектроскопом, изображена на рис. 8. Радиоволны, возбуждаемые клистронным генератором K, поступают через волновод в резонатор P, внутри которого помещается исследуемое парамагнитное вещество; клистронный генератор излучает колебания, лежащие в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн. Резонатор располагают между полюсами электромагнита NS. Интенсивность волн, прошедших через резонатор

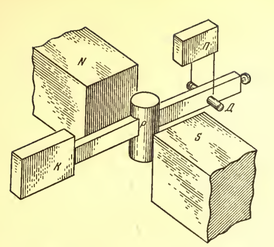


Рис. 8. Схема установки для измерения парамагнитного резонанса в сантиметровом диапазоне

К — клистрон, *Р* — резонатор, *Д* — детектор, *П* — регистрирующий прибор

с парамагнетиком, отмечается при помощи детектора *Д* и регистрирующего прибора *П*.

Для наблюдения резонанса необходимо подогнать частоту переменного поля к частоте прецессии. Опыты обычно ставятся при фиксированной частоте генератора, частота же прецессии постепенно меняется путем изменения напряженности поля при помощи реостата, регулирующего силу тока в электромагните. Когда напряженность однородного магнитного поля достигает резонансного значения, поглощение энергии парамагнетиком сильно возрастет и регистрирующий прибор отметит резкое падение интенсивности пришедшего радиосигнала.

Типичный фотоснимок кривой (или линии) поглощения при парамагнитном резонансе приведен на рис. 9. Изображенный на этом рисунке график показывает зависимость поглощенной энергии E (выраженной в относительных единицах) от напряженности статического магнитного поля H. Линия парамагнитного поглощения имеет определенную ширину. Парамагнетик интенсивно поглощает радиоволны, частоты которых близки (но не

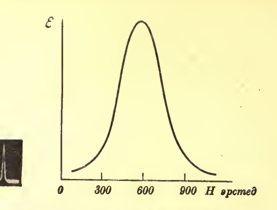


Рис. 9. Кривая поглощения при парамагнитном резонансе. Слева — ее изображение на экране осциллографа; справа — график зависимости поглощения от поля

обязательно равны) частоте ларморовой прецессии. Ширина приведенной на рис. 10 линии характеризуется величиной ~ 300 *эрстед* или, в шкале частот, $\sim 10^9$ *гц*.

Если исследования ведутся на низких частотах, в диапазоне метровых волн, то переменное магнитное поле создается катушкой, входящей в колебательный контур, соединенный с ламповым генератором (рис. 10). Иссле-

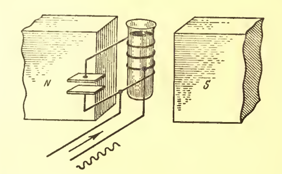


Рис. 10. Схема исследования парамагнитного резонанса в метровом диапозоне

дуемое вещество помещается внутрь катушки. Поглощение энергии радиочастотного поля регистрируется различными методами, например по изменению режима работы генератора.

Спектры парамагнитного резонанса и форма линий парамагнитного поглощения

До сих пор мы считали, что явление парамагнитного резонанса должно приводить к появлению лишь одной линии поглощения. Каждому элементу должно быть свойственно определенное положение линии поглощения, которое, как это вытекает из резонансного условия, зависит от величины *g*-фактора.

В действительности вместо одной линии поглощения часто появляется несколько (рис. 11). Если же наблюдается одна линия, то экспериментальное значение *g*-фактора оказывается, как правило, совершенно отличным от значения, присущего свободному атому.

В чем причина этих расхождений?

Дело в том, что парамагнитный резонанс большей частью наблюдается в твердых телах, где влияние на парамагнитный атом соседних с ним частиц оказывается

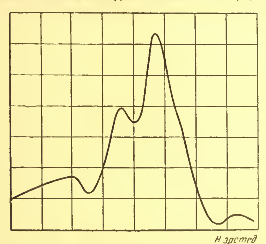


Рис. 11. График сложного спектра резонансного парамагнитного поглощения

весьма существенным. В ионных кристаллах это влияние заключается прежде всего в том, что электронная оболочка атома находится под действием неоднородного внутрикристаллического электрического поля. У солей элементов группы железа действие кристаллического поля настолько сильно, что орбитальное движение электронов «замораживается» и вследствие этого орбитальный магнетизм внешних электронов оказывается подавленным. Магнетизм атома поэтому становится чисто спиновым, и, следовательно, g-фактор будет приблизительно равен 2.

Небольшие отклонения g-фактора от 2 объясняются остатком орбитального движения. По этой же причине интервалы между магнитными («спиновыми») подуровнями оказываются неодинаковыми. Вместо картины расщепления энергетического уровня атома в магнитном поле, изображенной на рис. 4, мы теперь получим другую (рис. 12). Это распадение одной линии парамагнитного резонанса на несколько компонент и называют «тонкой структурой». На рис. 13 приведен снимок тонкой структуры в спектре парамагнитного резонанса, наблюденного в синтетическом рубине и обязанного примесям хрома. Вместо одного максимума поглощения (см. рис. 9) мы теперь имеем четыре пика на абсорбционной кривой.

В некоторых случаях наблюдается так называемая «сверхтонкая структура» спектров парамагнитного резонанса. Если взять очень разбавленный (твердый или жидкий) раствор соли марганца, то наблюдаемая обычно линия резонансного парамагнитного поглощения распадается на шесть компонент (рис. 14). Обнаруживается, как говорят, сверхтонкая структура линий парамагнитного резонанса.

В чем причина этой структуры? До сих пор магнитные свойства атомов мы объясняли намагничиванием электронной оболочки. Между тем атомные ядра также обладают механическими и магнитными моментами. Момент вращения, или спин, ядра может принимать значения $Ih/2\pi$, где $I = {}^1/_2,\ 1,\ {}^3/_2, \ldots$ Магнитные моменты ядер примерно в тысячу раз меньше магнетона Бора. Магнитный момент всего атома складывается из моментов электронов и ядра. В зависимости от угла между электронным и ядерным моментами суммарный момент может принимать $2I + 1$ различных значений, которые,

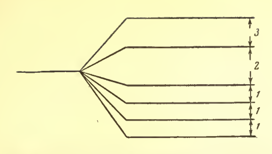


Рис. 12. Под действием электрического поля кристалла интервалы между магнитными спиновыми подуровнями перестают быть одинаковыми. Длины стрелок *1*, *2*, *3* различны

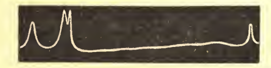


Рис. 13. Снимок тонкой структуры спектра парамагнитного резонанса в синтетическом рубине

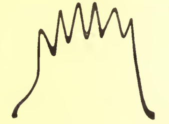


Рис. 14. Сверхтонкая структура линий парамагнитного резонанса Mg^{++}. Спин ядра $I = 5/2$; линия расщепляется на $2I+1=6$ компонент

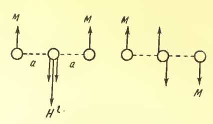


Рис. 15. Внутреннее магнитное поле. На центральный атом действует поле: слева — $H^1 = -2\beta/a^3$, если моменты крайних атомов параллельны; справа — $H^1 = 0$, если моменты антипараллельны

понятно, мало отличаются друг от друга. В результате вместо одной линии поглощения получается $2I+1$ линий. У марганца спин ядра $I={}^5/_2$, поэтому сверхтонкая структура состоит из шести компонент.

Изучение сверхтонкой структуры интересно тем, что оно дает эффективный метод определения спина ядра. Кроме того, по интервалу между компонентами линий парамагнитного резонанса можно судить о величине магнитного момента ядра. Заметим, что отклонение g-фактора от спинового значения сильно зависит от ориентации кристалла по отношению к статическому магнитному полю. Поэтому наблюдение тонкой структуры линий возможно лишь в монокристаллах.

Внимание многих исследователей привлекает изучение формы линий парамагнитного резонанса.

Чем же определяется форма линий и, прежде всего, их ширина?

Одной из причин расширения линий парамагнитного резонанса является неоднородность поля, создаваемого электромагнитом. Однако современная техника позволяет настолько усовершенствовать магниты, что расширение линий, обязанное неоднородности поля, может быть сделано ничтожно малым.

Основную роль в расширении линий играет обычно внутреннее магнитное поле парамагнетика. На каждый парамагнитный атом действует магнитное поле, создаваемое соседними атомами. Возьмем для примера три атома, расположенные на прямой (рис. 15). Пусть момен-

ты атомов равны магнетону Бора β, а расстояние между соседними частицами равно a. Тогда напряженность магнитного поля, действующего на центральный атом, есть $\sim 2\beta/a^3$, если моменты крайних атомов параллельны друг другу; оно равно нулю, если они антипараллельны. Так как направления атомных моментов распределены хаотически, то изменения магнитного поля при переходе от одного атома к другому носят случайный характер. Внутреннее магнитное поле, неодинаковое для различных атомов, действует подобно неоднородному полю электромагнита. Средняя величина напряженности внутреннего поля равна примерно $H^1 \approx \beta/a^3$, и, следовательно, ширина линии, обусловленная магнитными взаимодействиями, имеет порядок $\Delta\nu \approx \beta H^1/h \approx \beta^3/a^3 h$.

Если для межатомного расстояния принять $a = 3\cdot10^{-8}$ *см* и учесть, что $\beta \approx 10^{-20}$ и $h \approx 6\cdot10^{-27}$, то получим $\Delta\nu \approx 10^9$ *гц*. Эта величина значительна, если вспомнить, что частота прецессии Лармора в магнитном поле в 3000 *эрстед* равна 10^{10} *гц*.

Причиной расширения линий парамагнитного резонанса служит также спин-решеточное взаимодействие, которое, подобно трению, затормаживает прецессионное движение атомных магнитных моментов.

Если через T обозначить время парамагнитной релаксации, то для громадного большинства атомов частоты прецессии лежат в пределах от ν_0 до $\nu_0 - (1/T)$. Величина $\Delta\nu = 1/T$ и служит мерой расширения линий парамагнитной релаксации из-за спин-решеточного взаимодействия.

Таким образом, с одной стороны, ширина линий определяется магнитными взаимодействиями, с другой — спин-решеточным взаимодействием. Каждый из этих двух факторов может быть сделан главным путем изменения условий эксперимента. Магнитные взаимодействия быстро уменьшаются с увеличением расстояния между магнитными частицами. Поэтому применение твердых (или жидких) растворов, в которых значительная часть парамагнитных атомов заменяется диамагнитными, позволяет сделать магнитное расширение очень малым.

Сильная температурная зависимость спин-решеточного взаимодействия позволяет во много раз уменьшить вызываемое им расширение путем понижения темпера-

туры парамагнетика. Так, в солях редкоземельных элементов при комнатной температуре не удается обнаружить эффект парамагнитного резонанса, ибо линии полностью расплываются из-за сильной спин-решеточной связи ($T \approx 10^{-11} - 10^{-13}$ сек.). Наблюдение эффекта становится, однако, возможным при температуре жидкого водорода или гелия. Напротив, в солях меди эффект легко наблюдается при комнатной температуре. Время парамагнитной релаксации в этом случае велико ($T \approx$ $\approx 10^{-7}$ сек.); ширина линии определяется магнитными взаимодействиями и от температуры не зависит. При разбавлении парамагнитных атомов диамагнитными ширина будет уменьшаться до некоторого предела, определяемого спин-решеточным взаимодействием.

Что дает изучение парамагнитного резонанса

Открытие парамагнитного резонанса положило начало новому этапу в развитии современной теории магнетизма. Началось всестороннее изучение свойств носителей парамагнетизма. По положению линий резонансного поглощения с большой точностью определяются гиромагнитные отношения. Из картины тонкого расщепления линий устанавливается структура уровней энергии. По форме линий делаются заключения о роли и величине различных взаимодействий между пара- и диамагнитными частицами, о механизме спин-решеточной связи.

Следует отметить, что явление парамагнитного резонанса может быть также наблюдаемо в суммарно диамагнитных телах, если только они содержат некоторое число парамагнитных частиц. Так, например, в диамагнитных металлах эффект может быть установлен благодаря наличию электронов проводимости.

Магнитные свойства вещества самым тесным образом связаны с их структурой, и поэтому парамагнитный резонанс оказался ценным методом изучения строения вещества, широко применяющимся в различных областях физики и химии. Хорошо известно, какую огромную роль сыграла оптическая спектроскопия в создании теории атома. Оптики преимущественно занимаются спектрами паров и газов. Парамагнитный резонанс существен-

но дополняет оптические методы исследования, открывая новые возможности спектроскопического изучения твердых и жидких тел.

Из различных типов твердых парамагнетиков лучше всего изучены кристаллы солей элементов переходных групп таблицы Менделеева. Теория магнитного поведения этих кристаллов поддается наиболее совершенной разработке. К тому же парамагнитные соли нашли важное практическое применение в качестве рабочего вещества в установках для получения сверхнизких температур методами магнитного охлаждения.

Помимо ионных кристаллов, парамагнитный резонанс исследован во многих металлах и полупроводниках, в которых обычно эффект обязан электронам проводимости. Отклонения измеренного g-фактора от известного значения для свободного электрона, форма резонансной линии, ее зависимость от температуры позволяют сделать ряд заключений о характере взаимодействий электронов проводимости друг с другом и с остовом кристаллической решетки.

Многие вещества обнаруживают явление парамагнитного резонанса после облучения нейтронами, рентгеновыми или γ-лучами. В кристаллах солей щелочных металлов типа KCl источником эффекта являются образующиеся при облучении центры окрашивания. Открывается возможность исследовать скорость образования и исчезновения этих центров. Практический интерес имеет возможность построить измеритель интенсивности потока нейтронов, рентгеновых или γ-лучей, основанный на наблюдении величины парамагнитного резонансного поглощения.

Детальному изучению подверглись жидкие растворы парамагнитных солей. Получен ряд данных о строении сольватных оболочек, о комплексообразовании, о характере взаимодействия парамагнитных частиц с тепловым движением, о гиромагнитных отношениях и т. п.

Большой интерес для химии имеет исследование парамагнитного резонанса в свободных радикалах. В настоящее время эффект изучен более чем в 100 различных веществах. Большая чувствительность метода, позволяющая обнаружить эффект на образцах, содержащих лишь 10^{-11} *моля* вещества, заставляет предполагать, что от устойчивых радикалов удастся перейти к изучению ра-

дикалов недолговечных, образующихся, например, в ходе многих химических реакций. Интересно, что методом парамагнитного резонанса были обнаружены свободные радикалы в растительных и животных тканях. Можно ожидать, что парамагнитный резонанс найдет важные применения как метод анализа и контроля в химическом производстве в тех случаях, когда процессы зависят от наличия свободных радикалов.

Исследования парамагнитного резонанса позволяют получить ценные данные для физики атомного ядра. Из сверхтонкой структуры парамагнитных спектров определены спины и оценены магнитные моменты некоторых ядер. В этом отношении наиболее важно изучение редкоземельных элементов и актинидов, для которых метод парамагнитного резонанса является почти единственным.

Наконец, следует отметить еще одно интересное приложение метода парамагнитного резонанса. Обычно распределение направлений ядерных спинов в веществе является совершенно хаотическим. Оказалось, что в известных условиях представляется возможность упорядочить ядерные спины, выстроить их в одном направлении. Эта «ориентация» ядер необходима для решения ряда вопросов ядерной физики. На использовании парамагнитного резонанса основано несколько методов ориентации ядер.

Парамагнитный резонанс нашел некоторые технические применения. Линии поглощения свободных радикалов часто крайне узки, их ширина не превышает 0,1 *эрстед*. Такие линии используются для прецизионных измерений магнитных полей; напряженность поля определяется с точностью до пятого знака. Эти же узкие линии могут быть использованы для высокой стабилизации магнитного поля.

Особенно большое значение имеет обнаружившаяся в последние годы возможность использования явления парамагнитного резонанса для создания квантовых парамагнитных усилителей, обладающих исключительно низким уровнем собственных шумов. Эти усилители, называемые часто мазерами, позволяют значительно увеличить дальность радиолокации, намного повысить чувствительность радиотелескопов, на больших расстояниях

обеспечить надежную радиосвязь с космическими кораблями.

В нашем очерке мы смогли лишь коротко остановиться на разнообразных применениях парамагнитного резонанса. Ясно, однако, что открытие парамагнитного резонанса дало в руки физиков и химиков новый эффективный метод изучения строения вещества. Бесспорно также, что будут найдены новые практические приложения парамагнитного резонанса.

Квазичастицы в современной физике*

Член-корреспондент Академии наук СССР
И. М. Лифшиц

Поле и частицы

Среди новых понятий и представлений, которыми обогатила наши знания современная физика, одним из наиболее интересных и глубоких является, несомненно, представление о частицах и квазичастицах.

В доквантовой, классической физике XIX — начала XX в. понятие частицы как некоторого сгустка материи не нуждалось, пожалуй, ни в каких дополнительных разъяснениях. Разнообразные свойства этих частиц, которые постепенно становились нам известными, долгое время не нарушали интуитивных, механических представлений о строении вещества и о законах его движения. Понятие «элементарной частицы» связывалось с ее неизменностью и неделимостью на данном этапе развития науки. Если открытие структуры атома заставило считать электроны, а затем и протоны элементарными частицами заряженной материи, то открытия последних двух-трех десятилетий увеличили число известных нам различных элементарных частиц (как заряженных, так и нейтральных) во много раз.

Однако самым значительным изменением в наших представлениях о строении материи является не сам факт наличия многих типов элементарных частиц, а открытие таких свойств этих частиц, которые никак не совместимы

---

* «Природа», 1958, № 5.

с наглядной механической картиной вещества и потому потребовали радикального пересмотра наших представлений о природе частицы.

Речь идет о двух основных группах закономерностей: о двойственной, корпускулярно-волновой природе вещества, которая находит свое отражение в разнообразных явлениях и свойствах частиц, и о взаимопревращаемости различных видов частиц, лежащей в основе взаимодействия между ними.

Как известно, классическая физика знала два вида материи: вещество, состоящее из частиц (или частицу как элементарный кирпичик этого вещества), и поле (точнее, электромагнитное поле). Корпускулярное строение вещества уже предполагало наличие дискретных порций этого вещества — корпускул, т. е. частиц. В то же время электромагнитное поле трактовалось как нечто непрерывное, не обладающее дискретным строением.

Открытие корпускулярных свойств света и, с другой стороны, волновых свойств электронов привело к установлению той своеобразной картины материи, которая характерна для современной физики — к синтезу непрерывного и дискретного поля и частицы. Дискретные порции электромагнитного поля, так называемые кванты света, или фотоны, представляют собой элементарные частицы электромагнитного поля. В ряде явлений фотоны ведут себя как частицы (эффект Комптона, фотоэффект), тем не менее никакого последовательного истолкования наблюдаемых свойств света и его взаимодействия с веществом нельзя было бы получить, если бы мы забыли о том, что корпускулярная картина является лишь одной стороной описания электромагнитного поля; вторая, полевая картина является как бы другой «проекцией» свойств той же материи.

Открытие таких волновых свойств вещества, как дифракция электронов, также показало, что и для вещества корпускулярная картина является лишь одной стороной, одной проекцией свойств этого вещества, в то время как другая проекция этих свойств характерна для непрерывной среды. Подобно тому, как фотон можно рассматривать в качестве элементарной частицы электромагнитного поля, так и электрон и соответствующую ему античастицу — позитрон можно рассматривать как элементарную частицу особого электронно-позитронного поля.

Эти идеи лежат в основе современной квантовой механики и квантовой теории полей, согласно которым поле и частица не противопоставляются друг другу, а выступают как две стороны одной и той же реальности. Если исходить из уравнений квантовой теории полей, то их квантовые свойства могут быть описаны корпускулярным языком. Точно так же уравнения квантовой механики частицы приводят к «полевым» характеристикам их движения. В конечном итоге оба подхода оказываются эквивалентными.

Хотя до сих пор мы говорили для определенности об электромагнитном и об электронно-позитронном поле (или, что то же, о фотонах, об электронах и позитронах), все сказанное относится в равной мере ко всем другим известным в настоящее время элементарным частицам и соответствующим полям.

Итак, мы выяснили, что частица в современной физике достаточно сильно отличается от той простой механической модели, которая связывалась с этим понятием в классической физике. Постараемся теперь уяснить себе, какие же характерные признаки присущи частицам в квантовой физике.

Помимо таких постоянных характеристик, как масса и заряд, классическая частица, как всякая механическая система, обладает в каждый момент набором динамических характеристик — импульсом, координатой, энергией и т. д. Эти характеристики полностью определяют состояние частицы как механической системы, и именно с ними имеет дело физик, изучающий закономерности поведения элементарных частиц.

Такие же величины определяют тип частицы и ее состояние в квантовой физике, с тем только различием, что набор динамических характеристик для квантовой частицы менее «полон», чем для классической: согласно принципу неопределенности, для квантового объекта одновременное точное задание всех динамических характеристик лишено смысла. Так, например, в состоянии, в котором частица обладает определенным импульсом, понятие координаты для нее лишено смысла, и наоборот. Одновременное задание и координаты и импульса возможно лишь приближенно, с некоторой неточностью. Соотношение неопределенности $\Delta p \cdot \Delta x \sim h$ (h — постоянная Планка), указывающее меру этой неточности, выражает собой предел приме-

нимости понятий, заимствованных из классической физики, для квантового объекта (частицы). Неполная применимость классического способа описания связана именно с тем, что квантовая частица имеет, наряду с корпускулярными, также и полевые (волновые) свойства.

Поскольку, как было указано выше, можно ввести понятие частиц, если исходить из первоначальной полевой картины и учитывать квантовые свойства поля, то целесообразно проследить, как именно возникают эти корпускулярные признаки у поля, другими словами, как вводится понятие частиц в современной квантовой теории полей. Разумеется, мы имеем в виду чисто описательное изложение, так как этот вопрос не может быть разъяснен полностью без помощи формального аппарата теории.

Поле как пространственно-непрерывная среда может также рассматриваться как некоторая динамическая система. Эта система может находиться в различных импульсно-энергетических состояниях. Среди этих состояний есть одно наинизшее (подобно тому как для классической системы наинизшее энергетическое состояние есть состояние покоя), которое называется «вакуумом» поля. Таким образом, физический вакуум в современной теоретической физике означает некоторое особое состояние всех полей, т. е. *особое состояние материи, при котором частицы как бы отсутствуют.* Более высокие, так называемые возбужденные энергетические состояния поля связаны с появлением отдельных дискретных порций энергии и импульса. Эти порции энергии поля (кванты) называются его элементарными возбуждениями. Именно эти элементарные возбуждения полей и определяются как частицы в современной физике.

Может показаться странным, что понятие элементарной частицы связывается с энергией возбуждения полей — ведь энергия является лишь атрибутом материи, а не самой материей. Дело, однако, разъясняется весьма просто, если учесть, что само поле материально; более того, квантовые поля — это наиболее общий вид материи, известный в настоящее время. С другой стороны, соотношение $\varepsilon = mc^2$ связывает энергию ε элементарного возбуждения с массой m частицы, которую это возбуждение собой представляет. Энергия элементарного возбуждения связана с его импульсом. Наименьшее значение энергия возбуждения имеет при импульсе, равном нулю, — это и есть

та минимальная энергия, которая должна быть затрачена для появления элементарного возбуждения, т. е. для рождения частицы. Строго говоря, именно эта энергия определяет массу частицы, точнее, ее массу покоя. Так, например, энергия возникновения пары элементарных возбуждений электронно-позитронного поля (т. е. электрона и позитрона) — порядка 1 *Мэв*, что соответствует массам электрона и позитрона $\sim 10^{-27}$ *г*.

Энергия элементарных возбуждений электромагнитного поля начинается с нуля; это означает, другими словами, что масса покоя фотона равна нулю.

Различные поля взаимодействуют друг с другом, и это взаимодействие проявляется в тех силах, с которыми частицы действуют друг на друга. Параметры, характеризующие эти взаимодействия, носят названия зарядов частиц. В зависимости от того, с каким полем рассматривается взаимодействие, можно говорить об электрическом заряде, мезонном заряде и т. д. Так, например, электрически нейтральная частица — нейтрон — в первом приближении не взаимодействует с электромагнитным полем, ее электрический заряд равен нулю [1].

Итак, мы познакомились с тем, как в теории квантовых полей возникает понятие частиц со всеми их характерными признаками — зарядом, массой и динамическими характеристиками.

Все сказанное до сих пор имело своей целью разъяснить значение понятия частицы в современной физике; все это можно резюмировать в виде одного особенно важного утверждения: *частицы можно рассматривать как элементарные возбуждения квантовых полей*. Именно это утверждение дает нам базу для перехода к той основной теме, которой посвящена данная статья, — к вопросу о квазичастицах и их роли в современной физике.

Частицы и квазичастицы

Нам придется начать с некоторого уточнения тех положений, которые были нами высказаны ранее. Прежде всего речь идет о пределе применимости концепции эле-

---

[1] Взаимодействие нейтрона с электромагнитным полем определяется его магнитным моментом и является релятивистским эффектом.

ментарных возбуждений. Вся описанная выше картина имеет место лишь на достаточно низких уровнях возбуждения полей, когда плотность частиц невелика и их взаимодействие пренебрежимо мало, другими словами, когда система частиц может еще рассматриваться как идеальный газ. В случае, когда энергия взаимодействия на одну частицу становится порядка средней кинетической энергии, приходящейся на каждую частицу, говорить о независимом движении отдельных частиц уже нельзя и вся сформулированная выше картина теряет силу.

Второе обстоятельство заключается в следующем. Существуют поля двух типов: в одном из них элементарные возбуждения возникают поодиночке и на их число не накладывается никаких ограничений; такое положение имеет место, в частности, в случае электромагнитного поля. В полях второго типа элементарные возбуждения возникают попарно, представляя собой соответственно частицу и античастицу (например, электрон и позитрон, протон и антипротон, нейтрон и антинейтрон и т. д.). В этом случае приходится учитывать дополнительные «законы сохранения» — например, закон сохранения заряда (или иначе — разности числа частиц и античастиц). Число частиц в такой системе не может уже сделаться сколь угодно малым, и это означает, что наинизшее энергетическое состояние такой системы (например, системы с не равным нулю зарядом), так называемое основное состояние системы, уже не будет вакуумом, как мы это определили раньше. Собственно говоря, вакуум является абсолютно наинизшим состоянием полей; однако если учесть законы сохранения, то для каждой системы существует свое основное состояние, отнюдь не соответствующее вакууму. Так, основное состояние произвольной нейтральной системы, состоящей из электронов и ядер, соответствует образованию атомов и молекул, а отнюдь не аннигиляции этих частиц.

Таким образом, в любой физической системе существует некоторое основное (наинизшее) энергетическое состояние. В классической физике такое основное состояние есть состояние покоя, при котором взаимное расположение частиц отвечает минимуму потенциальной энергии. Макроскопическая система, находящаяся в основном состоянии, с точки зрения термодинамики есть система при

температуре абсолютного нуля. Если учесть также, что взаимное расположение частиц, обеспечивающее минимум потенциальной энергии их взаимодействия, в разных точках макроскопической системы должно совпадать (т. е. должно периодически повторяться), то мы приходим к выводу, что структура любой системы при температуре абсолютного нуля должна соответствовать кристаллической решетке (т. е. при достаточно низких температурах любое вещество должно быть кристаллическим).

Квантовая механика вносит существенные поправки в такого рода рассуждения. Прежде всего, состояние абсолютного покоя частиц невозможно хотя бы потому, что при этом частицы должны иметь определенные координаты (координаты положений равновесия) и определенные (равные нулю) импульсы; однако такое утверждение противоречит принципу неопределенности. Поэтому основным состоянием должно быть некоторое состояние движения. Для кристалла, например, это означает, что его атомы не закреплены в определенных точках (узлах) решетки, а совершают некоторое движение вблизи своих положений равновесия. Такое движение называется нулевыми колебаниями системы.

Однако наличие нулевого движения может привести и к более радикальному изменению характера основного состояния, нежели появление малых нулевых колебаний кристаллической решетки. При недостаточно большой энергии взаимодействия между атомами, составляющими решетку, амплитуды этих нулевых колебаний могут оказаться настолько большими, что вещество останется жидкостью вплоть до температуры абсолютного нуля. Такое положение имеет место только для гелия — наиболее легкого из благородных газов, атомы которых очень слабо взаимодействуют друг с другом.

Вернемся теперь к вопросу о структурных единицах вещества вблизи его основного состояния. Устойчивыми образованиями, составленными из электронов и ядер, являются атомы и молекулы. В свою очередь ядра — устойчивые образования, составленные из тяжелых частиц — нуклонов (нейтронов и протонов). В газах, при не слишком высоких температурах, когда средняя энергия взаимодействия молекул и их средняя кинетическая энергия малы по сравнению с энергией связи атомов в молекуле, т. е.

с энергией, которая необходима для разрушения молекулы, такими структурными единицами вещества (т. е. частицами) являются сами молекулы. Однако в конденсированном состоянии (жидком и особенно твердом) силы взаимодействия между молекулами обычно уже настолько велики, что индивидуальность молекулы теряется. Например, в кристаллах каменной соли (NaCl) говорить об отдельных молекулах NaCl уже невозможно, так как каждый атом Na одинаково связан с восемью соседними атомами Cl, и, таким образом, весь кристалл представляет собой как бы одну гигантскую молекулу. Но не только такое рыхлое образование, как молекула, утрачивает свою индивидуальность в конденсированном состоянии. Это может случиться и для более устойчивых образований — атомов. Так, например, в металлах часть электронов из атомных оболочек, благодаря сильному взаимодействию, перестает принадлежать определенным атомам и переходит в «коллективизированное» состояние. Эти электроны и определяют электрическую проводимость металлов. В этом случае нейтральные атомы уже не могут рассматриваться как структурные единицы металла.

Однако, поскольку энергия рождения электрона и позитрона и энергия расщепления атомных ядер во много раз больше, чем энергия связи электронов и ядер в любых телах, то ядра и электроны сохраняют свое значение как структурные единицы любого вещества вблизи основного состояния.

Совершенно аналогично мы всегда можем говорить о нуклонах как о структурных единицах атомного ядра, несмотря на сильное взаимодействие между ними, так как это взаимодействие все же значительно меньше, чем энергия образования новых ядерных частиц (например, пары протон—антипротон). Однако приписывать каждому нуклону в ядре определенный заряд (или, как говорят, рассматривать каждый нуклон в определенном зарядовом состоянии), иначе говоря, индивидуализировать нейтроны и протоны в ядре нельзя, так как энергия, необходимая для перехода нуклона из нейтрального в заряженное состояние, меньше энергии связи нуклонов в ядре. С этой точки зрения правильнее было бы говорить о ядре как о системе нуклонов с некоторым общим зарядом.

Итак, мы видим, что представление о тех или иных частицах как структурных единицах физической системы

связано с оценкой их энергии взаимодействия, точнее, с требованием малости этой энергии по сравнению с энергией образования самих частиц.

До сих пор мы говорили о строении вещества и понятие структурной единицы связывали со структурой физической системы в основном состоянии. Таким образом, частицы мы рассматривали как некоторый строительный материал данной физической системы. Однако свойства системы определяются не только ее строением, но в первую очередь особенностями ее динамического поведения, т. е. характером движений, происходящих в ней при переходе к более высоким, возбужденным энергетическим состояниям. В первом разделе статьи, рассматривая элементарные частицы как элементарные возбуждения квантовых полей, мы установили, что *эти частицы одновременно являются и структурными единицами вещества и структурными единицами движения*. Так, например, в электронном газе электроны являются и строительным материалом (элементарными кирпичиками вещества) и элементарными носителями его движения, т. е. носителями всех динамических свойств электронного газа в целом. Подобное положение имеет место не только для газа элементарных частиц, но и для любого идеального газа сложных частиц (ядер, атомов, молекул). Однако в общем случае конденсированной системы положение меняется радикальным образом.

Квантовая природа вещества проявляется в том, что на низких уровнях возбуждения движение в пространственно-однородной системе возникает в виде отдельных дискретных порций — элементарных возбуждений, обладающих определенной энергией и импульсом [2]. Полная энергия системы вблизи ее основного состояния складывается из энергии основного состояния и суммы энергий отдельных элементарных возбуждений. Но так как средняя энергия элементарных возбуждений оказывается

[2] Следует подчеркнуть, что пространственная однородность системы является условием для того, чтобы элементарные возбуждения обладали определенным импульсом. Для истинных частиц в вакууме это условие выполнено вследствие однородности вакуума; для элементарных возбуждений (квазичастиц) в кристаллах среда, однородная макроскопически, имеет периодическую структуру с микроскопической точки зрения. Это приводит к тому, что квазичастицы характеризуются не истинным импульсом, а весьма сходной величиной — квазиимпульсом.

меньше энергии взаимодействия между частицами, представляющими собой строительный материал вещества, то последние не могут являться элементарными носителями динамических свойств вещества. Такими носителями становятся сами элементарные возбуждения, которые поэтому и называются квазичастицами. Во всех динамических отношениях квазичастицы подобны обычным частицам (хотя, как мы увидим в дальнейшем, законы их движения могут оказаться значительно более сложными). Однако в противоположность обычным частицам, *квазичастицы не могут появиться в вакууме*; *они требуют некоторой среды*, *или фона*, *для своего возникновения и существования*, *так как*, *являясь носителями движения*, *они не представляют собой строительного материала той среды*, *в которой они существуют*.

Это различие между частицами и квазичастицами — основное, так как за его исключением все главнейшие общие свойства и проявления частиц и квазичастиц совпадают.

Если, однако, учесть, что существует взаимодействие между полями и благодаря этому каждая последующая элементарная частица возникает на некотором уже имеющемся фоне, то различие между частицами и квазичастицами становится еще меньше, и принципиально можно, увеличивая плотность среды, проследить переход от частиц к квазичастицам.

Рассмотрим теперь, какие признаки и свойства являются определяющими для всего поведения частиц и квазичастиц и позволяют, тем самым, произвести их систематизацию.

Энергетический спектр частиц. Вся динамика частиц (как и динамика квазичастиц) определяется тем, какова связь между их энергией ε и импульсом p. Зависимость $\varepsilon = \varepsilon(p)$ определяет так называемый закон дисперсии частиц, или их энергетический спектр. Для обычных классических частиц $\varepsilon = \frac{p^2}{2m}$, где m — масса частицы (рис. 1). Такая зависимость приводит к соотношениям ньютоновой механики, в частности к пропорциональности между импульсом и скоростью, силой и ускорением. В релятивистской теории, с учетом энергии покоя, закон дисперсии выражается формулой

$$\varepsilon = c\sqrt{m^2c^2 + p^2};$$

при $p = 0$ получаем для энергии покоя $\varepsilon_0 = mc^2$. Когда кинетическая энергия мала по сравнению с энергией покоя ε_0, мы приходим снова к классическому выражению $\varepsilon = \varepsilon_0 + p^2/2m$, если производить отсчет энергии от ее значения покоя ε_0. Для фотонов, у которых масса покоя $m = 0$, имеем $\varepsilon = cp$.

Для квазичастиц возможны законы дисперсии и более общего вида. Механические свойства таких квазичастиц имеют много необычных особенностей. В частности, само понятие «массы» квазичастицы является совершенно условным, поскольку различные соотношения, которые могут быть приняты в качестве определяющих для этого понятия, в случае общего вида закона дисперсии приводят не только к зависимости массы от скорости, но и не дают, по существу, однозначного результата.

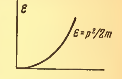


Рис. 1. График закона дисперсии для обычных частиц

Однако даже в случае простейшего закона дисперсии $\varepsilon = \varepsilon_0 + p^2/2\mu$, формально совпадающего с законом дисперсии обычных частиц (такой закон дисперсий характерен для многих квазичастиц при малых импульсах), понятие массы покоя $m_0 = \varepsilon_0/c^2$ не имеет ничего общего с «динамической» массой, роль которой играет в этом случае величина μ. Последнее связано с тем, что квазичастицы сами по себе не являются структурными единицами вещества; для них нельзя, в частности, говорить о совпадении понятий «тяжелой» и «инертной» масс. Наконец, наличие фона вводит в механику квазичастиц преимущественную систему отсчета (связанную с покоящейся средой — фоном) и, следовательно, делают принцип относительности Галилея неприменимым.

С т а т и с т и к а. Кроме закона дисперсии, который определяет динамику отдельной частицы, важным характерным признаком являются ее свойства как члена коллектива таких частиц. Так, например, в случае электронного газа в одном и том же квантовом состоянии не может находиться более одной частицы; это значит, в частности, что в таком газе два электрона не могут иметь одновременно в точности одинаковые импульсы. Напротив, в газе фотонов в каждом квантовом состоянии может находиться любое число частиц. Это значит, что может существовать сколько угодно фотонов с данным значением импульса.

Такого рода свойства, проявляющиеся лишь при наличии многих частиц, определяют их статистические законы, или, как говорят, их статистику. Наиболее существенны здесь возможные способы заполнения частицами квантовых состояний. В случае электронов, когда, как было указано, числа заполнения состояний не превышают единицы, говорят о статистике Ферми—Дирака; в случае фотонов, где в каждом состоянии может находиться любое число частиц и числа заполнения, таким образом, ничем не ограничены, — говорят о статистике Бозе—Эйнштейна.

Как показывает анализ, указанные статистические свойства тесно связаны с особой квантовой характеристикой отдельных частиц — с их спином (имеющим смысл внутреннего механического момента частицы). Возможные значения спина частицы являются кратными половине постоянной Планка. При этом оказывается, что частицы, обладающие полуцелым спином (например, электроны, протоны, нейтроны), подчиняются статистике Ферми—Дирака, частицы с целым спином (в частности, фотоны, мезоны, α-частицы) — статистике Бозе—Эйнштейна.

Эти статистические свойства весьма характерны не только для «истинных» частиц, но и для квазичастиц. Таким образом, наряду с динамическими характеристиками квазичастиц (законом дисперсии) и константами их взаимодействия (зарядом) определяющим признаком является также и статистика.

Некоторые виды квазичастиц

Разнообразие типов квазичастиц весьма велико, так как их характер зависит от вида среды и от особенностей ее основного состояния. В одной и той же системе может существовать несколько различных типов элементарных возбуждений, т. е. несколько типов квазичастиц. Мы не имеем в виду давать сколько-нибудь полную классификацию или систематизацию типов элементарных возбуждений. Поэтому мы ограничимся некоторыми наиболее характерными примерами, которые позволяют проиллюстрировать все сказанное ранее.

Фононы. Движение атомов твёрдого тела при низких температурах сводится к малым колебаниям этих атомов вблизи положений равновесия.

Как известно, колебательное движение сложной системы со многими степенями свободы может быть представлено в виде наложения отдельных «нормальных», или «главных», колебаний, каждое из которых имеет свою собственную частоту. При этом общая энергия колебательного движения системы оказывается равной сумме энергий отдельных нормальных колебаний.

В кристалле такие нормальные колебания представляют собой плоские волны, распространяющиеся через всю кристаллическую решетку. Каждая волна, помимо своей поляризации (т. е. направления смещения атомов), определяется так называемым волновым вектором $\vec{k}$, направление которого совпадает с направлением распространения, а величина обратно пропорциональна длине волны ($k = 2\pi/\lambda$); частота колебаний ω является функцией от волнового вектора $\vec{k}$. В кристалле существуют различные типы упругих волн, отличающиеся характером поляризации и законом дисперсии; среди них имеются так называемые акустические волны, частота которых стремится к нулю при стремлении длины волны к бесконечности ($\omega = uk$). Эти волны представляют собой обыкновенные звуковые волны, а константа u имеет смысл скорости звука.

Так в общих чертах выглядит классическая картина движения атомов кристалла.

Рассмотрим теперь, что нового дает в этой картине квантовая физика. Оказывается, что все сказанное выше сохраняется с тем различием, что энергия и импульс, связанные с каждым нормальным колебанием (каждой волной), квантуются, т. е. могут принимать только дискретные значения

$$E_n - E_0 = n\hbar\omega; \quad E_0 = \frac{\hbar\omega}{2}; \quad (\omega = \omega(\vec{k}))$$

$$p = n\hbar\vec{k}. \tag{1}$$

Эти значения оказываются кратными величинам ε, $\vec{p}$

$$\varepsilon = \hbar\omega; \quad \vec{p} = \hbar\vec{k}, \tag{2}$$

имеющими смысл, соответственно, энергии и импульса «элементарного возбуждения» колебательного движения в кристалле (E_0 имеет смысл энергии «нулевых» колебаний, о котором мы уже упоминали выше). Согласно

сказанному ранее, каждое такое элементарное возбуждение можно рассматривать как квазичастицу с импульсом (точнее, квазиимпульсом) $\vec{p}$ и энергией $\varepsilon = \varepsilon(\vec{p})$ [3].

Эти квазичастицы носят название фононов. Для акустических волн фононы представляют собой кванты звука, т. е. элементарные порции звуковой энергии, подобно тому как фотоны представляют собой кванты света. Аналогия простирается значительно дальше, если учесть, что из равенства $\omega = uk$ для звуковой волны и (2) вытекает закон дисперсии длинноволновых фононов

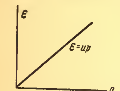


Рис. 2. График закона дисперсии для квазичастиц (фононов)

$$\varepsilon = up, \qquad (3)$$

отличающийся от закона дисперсии фотонов только тем, что вместо скорости света (c) в (3) стоит скорость звука (u), в общем случае зависящая от направления распространения (рис. 2).

Число n в выражении (1) для энергии нормальных колебаний нужно рассматривать при этом как число фононов с данным импульсом $\vec{p}$. Так как n — любое целое число, то фононы, как и фотоны, подчиняются статистике Бозе—Эйнштейна.

На примере фононов можно проследить и волновые и корпускулярные проявления квазичастиц: как волна фонон характеризуется частотой ω и волновым вектором $\vec{k}$; как частица — энергией ε и импульсом $\vec{p}$. Соотношения (2) с помощью квантовой постоянной Планка $\hbar$ связывают волновые и корпускулярные характеристики частицы и имеют универсальный характер.

Итак, в то время как структурными единицами кристаллической решетки можно считать отдельные атомы, структурными единицами движения такой решетки являются не отдельные атомы, а фононы, т. е. отдельные волны, несущие элементарные порции энергии и импульса.

Экситоны. В качестве второго примера мы рассмотрим своеобразные электронные возбуждения в кри-

---

[3] $\varepsilon(\vec{p}) = \hbar\omega\left(\frac{\vec{p}}{\hbar}\right)$.

сталле, на которые впервые обратил внимание Я. И. Френкель.

Как известно, отдельный атом может находиться в возбужденном электронном энергетическом состоянии, отделенном от основного (наинизшего) состояния конечной энергией возбуждения. Однако в кристалле, состоящем из большого числа одинаковых, сильно взаимодействующих между собой атомов, такое локализованное возбуждение является неустойчивым и как бы перескакивает с одного атома на другой. Если учесть симметрию кристалла, связанную с периодичностью его решетки, то оказывается, что подобное возбуждение представляет собой волну, распространяющуюся в кристалле так, что каждый атом периодически оказывается как бы в состоянии возбуждения. Импульс волны возбуждения связан с ее волновым вектором обычным соотношением $\vec{p} = \hbar\vec{k}$, а энергия с ее частотой — соотношением $\varepsilon = \hbar\omega$. Однако, в противоположность фононам, энергия такого возбуждения при $\vec{p} \to 0$ не стремится к нулю, поскольку с его появлением связана всегда энергия, равная по порядку величины энергии возбуждения отдельного атома. Такая волна электронного возбуждения носит название экситона. В соответствии со сказанным ранее, собственная энергия экситона (при $\vec{p} = 0$) отлична от нуля.

С п и н о в ы е в о л н ы. Особую роль в теории ферромагнетизма играют элементарные возбуждения в ферромагнетиках — так называемые спиновые волны, или ферромагноны [4]. Природу этих возбуждений проще всего представить себе следующим образом: основное состояние ферромагнетика соответствует тому, что элементарные магнитные моменты (спины) всех атомов одинаково ориентированы, образуя общий магнитный момент участка ферромагнетика. Состояние магнитного возбуждения связано с полным переворачиванием отдельного момента (спина) относительно всех остальных. Однако, как и в случае экситона, такое локализованное состояние возбуждения в системе одинаковых взаимодействующих атомов является неустойчивым, и роль элементарных возбуждений играют волны переворачивания магнитных моментов

[4] Эти волны были введены Ф. Блохом.

(спиновые волны), при которых состояние возбуждения как бы переходит последовательно от одного атомного слоя к другому.

Как и в предыдущих случаях, зависимость частоты спиновых волн от их волнового вектора определяет закон дисперсии соответствующих квазичастиц — ферромагнонов.

Элементарные возбуждения в сверхтекучей жидкости (HeII). Крайне любопытные особенности квантовой жидкости — HeII, обладающей свойством сверхтекучести [5], связаны с характером элементарных возбуждений в этой жидкости. В идеальном газе атомов гелия элементарные возбуждения, очевидно, сводились бы к кинетической энергии отдельных атомов; в этом случае ничто не мешало бы передаче энергии от отдельных атомов движущегося гелия к стенке и наоборот, что обусловливает обычный механизм трения.

Однако даже малое взаимодействие между атомами гелия (имеется в виду изотоп He^4) приводит к тому, что роль элементарных возбуждений играют некоторые коллективные движения, имеющие при малых импульсах характер звуковых волн [6]. При абсолютном нуле температуры элементарные возбуждения отсутствуют. Можно показать, что появление таких элементарных возбуждений за счет передачи энергии от движущихся стенок неподвижному гелию (при абсолютном нуле температуры)

---

[5] Это свойство было открыто П. Л. Капицей и впервые объяснено Л. Д. Ландау.

[6] Этот факт был показан Н. Н. Боголюбовым. Полученный им закон дисперсии имеет приближенный вид

$$\varepsilon = \sqrt{\alpha \cdot \frac{p^2}{2m} + (p^2/2m)^2}\,,$$

где m — масса атома газа, а α — параметр взаимодействия между атомами. При достаточно малых импульсах мы получаем

$$\varepsilon = up; \quad u = \sqrt{\alpha/2m} \quad (p^2 \ll 2m\alpha),$$

что соответствует фонону. Напротив, при больших импульсах $\varepsilon = p^2/2m \quad (p^2 \gg 2m\alpha)$, что соответствует отдельному атому. Таким образом, устремляя параметр взаимодействия α к нулю, мы можем проследить весь переход от коллективных движений к движениям отдельных атомов, иначе говоря,— переход от квазичастиц к частицам (атомам).

невозможно, так как при этом нарушались бы законы сохранения энергии и импульса, если только скорость гелия относительно стенок меньше некоторого критического значения. Это и означает, что такое движение происходит без трения, что приводит к свойству сверхтекучести. При температурах, отличных от нуля, в сверхтекучем гелии имеют место одновременно как бы два движения: газ элементарных возбуждений (число которых зависит от температуры) движется подобно нормальной вязкой жидкости (с диссипацией энергии); это движение газа элементарных возбуждений происходит на фоне общего перемещения всей «инертной» массы гелия, движущейся без трения.

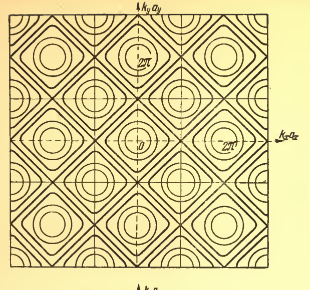
В противоположность описанным ранее элементарным возбуждениям в твердом теле, движение газа элементарных возбуждений в гелии имеет макроскопический характер и сопровождается переносом вещества, если только оно не компенсируется обратным потоком «сверхтекучей» компоненты. С другой стороны, как ясно иэ сказанного, атомы гелия не могут быть сами по себе разделены на «сверхтекучие» и «нормальные». Таким образом, в этом случае особенно наглядно выступает то обстоятельство, что структурными единицами реального движения (макроскопического переноса вещества) являются не отдельные атомы, а элементарные возбуждения.

Аналогичная картина имеет место, как было установлено в самое последнее время, при объяснении другого замечательного явления — сверхпроводимости ряда металлов при низких температурах.

Электропы проводимости в металлах. В качестве последнего примера квазичастицы мы приведем электроны проводимости в металлах.

Электроны в металле, взаимодействующие друг с другом и с полем кристаллической решетки, в кинетическом и термодинамическом отношениях эквивалентны идеальному газу квазичастиц со сложным законом дисперсии $\varepsilon(\vec{p})$. Заряд этих частиц равен заряду свободного электрона; они удовлетворяют статистике Ферми, число их также остается постоянным, и в этом смысле они стоят ближе к истинным частицам, чем другие описанные выше квазичастицы.

Ввиду сложности закона дисперсии электронов в металле удобной его характеристикой является форма



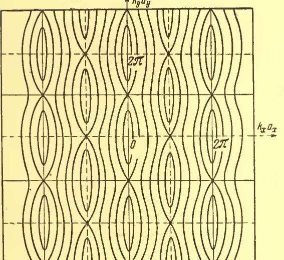


Рис. 3. Линии постоянной энергии электронов в металле в пространстве импульсов

k_x, k_y — составляющие волнового вектора; a_x, a_y — постоянные решетки; $\vec{p} = \hbar\vec{k}$

поверхностей постоянной энергии в пространстве импульсов, т. е. поверхности, определяемой уравнением $\varepsilon(\vec{p}) = \text{const}$. Для обычных частиц $\left(\varepsilon = \frac{p^2}{2m}\right)$ подобная поверхность представляет собой сферу с радиусом $p = \sqrt{2m\varepsilon}$. Для электронов в металле (как и для других квазичастиц в кристаллах) функция $\varepsilon(\vec{p})$ оказывается периодической, и поверхность постоянной энергии может иметь весьма сложную форму. На рис. 3 изображены плоские сечения подобных поверхностей в пространстве импульсов (т. е. линии постоянной энергии).

Своеобразие закона дисперсии электронов в металле делает их динамические свойства совершенно отличными от свойств обычных свободных электронов. Даже беглое перечисление этих особенностей потребовало бы много места и выходит за рамки настоящей статьи.

Нашей целью было разъяснение основной идеи о квазичастицах, примеры же, имеющие главным образом иллюстративный характер, естественно, не претендуют на полноту и отнюдь не исчерпывают известных типов квазичастиц. Так, например, мы ничего не говорим о ряде специфических возбуждений в полупроводниках [7].

Цель статьи будет достигнута, если нам удалось, хотя бы частично, разъяснить те новые и недостаточно привычные идеи, при помощи которых квантовая физика связывает понятие частиц и квазичастиц со структурой материи и ее движением.

---

[7] В частности, о поляронных возбуждениях или поляронах, введенных Л. Д. Ландау и С. И. Пекаром.

Общая теория относительности и эффект Моссбауэра *

Кандидат физико-математических наук
В. В. Миллер

Что произойдет, если мы направим снизу вверх луч света?

По современным воззрениям, луч света представляет собой поток частиц — световых квантов, или фотонов. Эти частицы обладают массой и притягиваются к Земле, как и любое другое тело такой же массы. Следовательно, при движении против сил тяготения энергия кванта уменьшится так же, как уменьшается кинетическая энергия брошенного вверх камня.

Экспериментальное подтверждение этого эффекта было бы убедительным доказательством справедливости предпосылок, лежащих в основе общей теории относительности Эйнштейна.

В чем же проявляется потеря квантом части его энергии? Так как по квантовой теории энергия кванта света пропорциональна его частоте, то при потере квантом части энергии на какую-то долю должна уменьшиться его частота. Но известно, что меньшие частоты находятся ближе к красному концу спектра. Следовательно, в «поднявшемся» свете каждая спектральная линия сместится к красному концу спектра.

Такое «красное смещение» действительно наблюдается в спектрах «белых карликов» — звезд грандиозной плотности и малого радиуса, сила тяготения на поверхности

* Статья была напечатана в журнале «Природа» в 1960 г. (№ 7) и позднее переработана.

которых в десятки тысяч раз превосходит силу тяготения на Земле. Однако при этом длина волны изменяется всего на десятые доли ангстрема, в то время как ширина звездных спектральных линий составляет несколько ангстрем.

Между тем выводы общей теории относительности так важны для науки, что уже давно ощущается необходимость проверки этой теории в лабораторных условиях, чтобы быть уверенным, что «красное смещение» связано именно с силой тяготения.

Но наши лаборатории находятся на Земле, а земное поле тяготения не так велико. И расстояния, на которые перемещается фотон, отнюдь не космические и не превышают в лучшем случае нескольких десятков метров. Можно подсчитать, что в этих условиях изменение длины волны будет составлять 10^{-15} долю первоначальной длины волны! Измерение должно быть проведено в пределах 15-го знака. До сих пор техника физического эксперимента была еще очень далека от таких высоких точностей.

Однако, как это часто бывает в науке, недавний прогресс в другой области, совершенно не связанной с теорией относительности, неожиданно дал в руки ученых новый, очень точный метод для регистрации чрезвычайно малых изменений частоты квантов. Речь идет о резонансном поглощении гамма-лучей.

Что такое резонансное поглощение гамма-лучей

Маятник колеблется с постоянной частотой, зависящей от его длины. Струна рояля, получившая удар, издает звук определенного тона, причем частота зависит от длины и толщины струны, удельного веса материала и натяжения.

Если электрический контур возбудить коротким электромагнитным импульсом, то напряжение в контуре будет колебаться с определенной частотой, зависящей от индуктивности и емкости контура. Эти частоты будут называться «собственными» для тех систем, в которых происходят колебания. Если внешнее переменное воздействие на систему будет производиться с частотой, равной собственной частоте системы, то произойдет резонансное поглощение энергии такого воздействия и амплитуда колебаний в системе будет очень велика. Явление резонанса

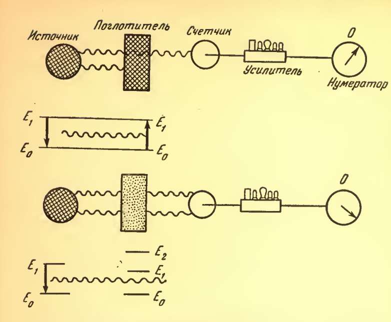


Рис. 1. Резонансное поглощение гамма-лучей. Когда энергетические уровни поглотителя и источника одинаковы, то с возбуждением ядра на этот уровень должно наблюдаться резонансное поглощение. Поэтому счетчик регистрирует меньше импульсов, чем при другом поглотителе (эквивалентном по нерезонансному поглощению)

хорошо известно и широко используется современной техникой. Только благодаря ему из тысяч частот радиоизлучений приемник можно настроить на одну определенную частоту.

Нечто аналогичное происходит и при ядерных реакциях. Если бомбардировать ядра протонами или нейтронами такой энергии, что вновь образующиеся ядра окажутся на одном из своих собственных энергетических уровней, то вероятность ядерной реакции станет во много раз большей, чем при других энергиях. Это называется резонансным взаимодействием. Казалось, что не только для протонов и нейтронов, но и для гамма-квантов должно существовать резонансное поглощение ядрами, однако этот эффект долго не удавалось обнаружить.

Обычно источником гамма-квантов служит вещество, ядра которого оказались в возбужденном энергетическом сос-

тоянии в результате предшествующего радиоактивного излучения (например, бета-распада). Возвращаясь в нормальное состояние, такое ядро испускает гамма-квант с энергией, равной разности энергий этих двух состояний. Можно сказать, что гамма-квант уносит энергию возбуждения ядра, как квант видимого света энергию возбуждения атома.

Если в качестве поглотителя берется такое же вещество, какое испускает гамма-квант, то можно быть уверенным, что у его ядер обязательно должен существовать такой же возбужденный энергетический уровень и, следовательно, можно ожидать появления резонансного поглощения. Это значит, что если мы на пути гамма-лучей поставим то же самое вещество, которое является излучателем, то количество гамма-квантов, попавших в счетчик, должно быть меньше, чем если поглотителем будет вещество, хотя и близкое по природе (атомному номеру и весу), но ядра которого не имеют данного энергетического уровня. Это пояснено на рис. 1.

Несмотря на такие отчетливые теоретические представления и достаточную чувствительность приборов, резонансное поглощение гамма-лучей обнаружить экспериментально физики не смогли. В чем же причина такого загадочного поведения? Ответ оказался довольно простым.

Дело в отдаче ядра

В 1946 г. советские физики И. Я. Барит и М. И. Подгорецкий и независимо от них в 1948 г. американские физики Поллард и Альбургер нашли решение этой загадки. Оказывается, надо было учесть отдачу ядра при вылете гамма-кванта, которая происходит по той же причине, по которой, например, испытывает отдачу ружье при выстреле или разгоняется ракета при вылете из нее газа.

По закону сохранения импульса количества движения импульс ядра Mv должен быть равен импульсу кванта (и направлен противоположно ему). Но приобретая некоторую скорость, ядро должно получить и энергию, пропорциональную квадрату этой скорости. На это уйдет часть энергии перехода ядра с высшего уровня на низший.

Такая же картина будет и при поглощении гамма-кванта ядром поглотителя, которое должно немного разогнаться от толчка, на что потребуется столько же энергии, сколько поглотило при отдаче испускающее ядро. Следовательно, энергия, которая пошла бы на возбуждение поглощающего ядра, будет равна уже не разности энергий уровней, а будет меньше ее на двойную энергию отдачи. Поэтому резонансное поглощение оказывается невозможным.

Проделаем простые математические выкладки. По теории относительности энергия $E = mc^2$, где m — инертная масса, а c — скорость света в пустоте. Для кванта $E = h\nu$, где ν — частота, а h — постоянная Планка [1]. Следовательно, мы должны приписать свету инертную массу $m = \frac{h\nu}{c^2}$.

Импульс кванта $p = mv$ должен быть равен $p = \frac{h\nu}{c^2} \cdot c = \frac{h\nu}{c}$. Из закона сохранения импульс кванта равен импульсу отдачи ядра Mv, откуда скорость ядра $v = \frac{h\nu}{Mc}$, а кинетическая энергия ядра

$$\frac{Mv^2}{2} = \frac{M}{2}\left(\frac{h\nu}{Mc}\right)^2 = \frac{1}{2}\frac{(h\nu)^2}{Mc^2}.$$

При поглощении кванта ядро также получает энергию, равную вычисленной нами. Следовательно, полная потеря энергии на отдачу

$$\Delta E_{\text{отд}} = 2\left(\frac{Mv^2}{2}\right) = \frac{(h\nu)^2}{Mc^2}.$$

Попробуем компенсировать потерю энергии

Если мы каким-нибудь способом возместим гамма-кванту эту двойную потерю энергии, то можно будет обнаружить резонансные эффекты. На помощь приходит эффект Допплера.

Если источник света (или звука) движется по направлению к наблюдателю со скоростью v, то частота излучае-

[1] Постоянная Планка равна $6{,}6 \cdot 10^{-27}$ *эрг·см*.

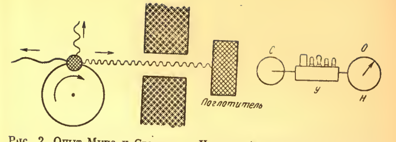


Рис. 2. Опыт Муна и Сторраста. Частота (и энергия) квантов, летящих вперед по движению, повышается, и оказывается возможным резонансное поглощение

мого света (или звука) становится больше. Происходит «фиолетовое» смещение.

Увеличение частоты выражается формулой

$$\nu = \nu_0(1 + v/c),$$

где ν — частота колебания и c — скорость света (или звука).

Если источник колебаний удаляется от наблюдателя, то частота становится меньше («красное» смещение). Это и называется эффектом Допплера.

Наблюдая величину изменения частоты световых волн в спектрах звезд («фиолетовое» или «красное» смещение), можно определить, приближается к нам данная звезда или удаляется.

При движении источника света по направлению к наблюдателю частота, а следовательно, и энергия кванта увеличатся на некоторую величину. Естественно попытаться сообщить источнику нужную скорость и увеличить за счет эффекта Допплера энергию гамма-квантов на такую величину, которая компенсирует энергию, потраченную на две отдачи [2].

Такой опыт (рис. 2) осуществили Мун и Сторраст, поместив источник гамма-лучей на обод быстро вращающегося колеса. Для изотопа ртути Hg^{198} удалось обнаружить резонансное поглощение гамма-квантов при линейной скорости обода колеса в 700 *м/сек*.

[2] Необходимая для этого скорость источника $v = \frac{Mc}{h\nu}$.

Были использованы и другие способы компенсации потери энергии гамма-квантов при помощи допплеровского эффекта. При этом скорость ядер задавалась либо тепловым движением, либо отдачей от предыдущего радиоактивного распада, однако наблюдаемый эффект был очень мал.

Возможно устранить отдачу

Несколько лет назад немецкий физик Моссбауэр нашел способ вообще устранить отдачу ядра при испускании кванта. Его соображения основывались на результатах теории Лэмба, описывающей взаимодействие медленных нейтронов с кристаллической решеткой. Моссбауэр распространил положения этой теории на случай поглощения гамма-квантов.

Оказалось, что если излучающее ядро входит в состав кристаллической решетки, то оно не является свободным, и поэтому передачу энергии отдачи ядру надо рассматривать в связи с воздействием на него других атомов решетки. Точнее, отдача передается не ядру, а всей кристаллической решетке. При этом в большинстве случаев отдача при испускании кванта приводит к возбуждению колебаний атомов в решетке (на это расходуется часть энергии кванта). Однако в некоторой доле случаев импульс отдачи принимает вся решетка как целое, а так как масса решетки в миллиарды миллиардов раз больше, чем масса одного ядра, то во столько же раз меньше ее скорость, а следовательно, и энергия отдачи (в формуле $\Delta E_{\text{отд}} = \frac{(h\nu)^2}{Mc^2}$ масса M является теперь массой всей решетки).

Если испускание и поглощение кванта могут произойти без отдачи, то должно быть возможным резонансное поглощение кванта ядром.

Теория и опыт показывают, что для того, чтобы вероятность испускания гамма-кванта без передачи энергии возбуждения кристаллу была велика, должны выполняться следующие условия:

1) энергия отдачи $\Delta E_{\text{отд}}$ должна быть мала (это будет, когда энергия квантов $h\nu$ мала, а ядро имеет большую массу M);

2) максимальная энергия спектра возможных колебаний атомов в кристаллической решетке при низких температурах должна быть больше (или порядка) энергии отдачи: $E_{\text{макс}} > \Delta E_{\text{отд}}$;

3) средняя энергия тепловых колебаний в кристалле должна быть значительно меньше, чем обе эти энергии ($E_{\text{тепл}} \ll E_{\text{отд}}$ или $E_{\text{макс}}$), так как наличие интенсивных тепловых колебаний в кристалле стимулирует передачу энергии отдачи кристаллу.

Моссбауэр произвел опыты с гамма-излучением ядер иридия (Ir^{191}) и нашел, что если источник и иридиевый поглотитель охладить до температуры жидкого азота, то поглощение гамма-лучей в слое иридия заметно возрастает. Это связано с ростом резонансного поглощения: гамма-лучи иридия имеют довольно большую энергию, и поэтому излучение и поглощение без отдачи заметны лишь при низкой температуре.

Несколько позже эти опыты были повторены группой американских физиков, но уже не при температуре жидкого азота (88° K), а при температуре жидкого гелия (4° K). Эффект при этом увеличился примерно в 2,5 раза.

Моссбауэр предложил остроумный метод для более подробного исследования резонансного поглощения. Источник излучения монтировался на ободе медленно вращающегося диска, причем поглотители из свинца позволяли попадать в счетчик только квантам, испущенным в момент движения источника по направлению, скажем, к счетчику (рис. 3). Источник и поглотитель охлаждались

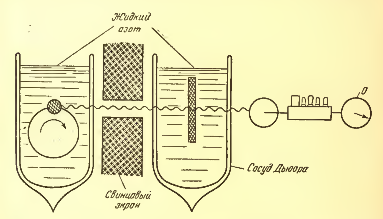


Рис. 3. Схема опыта Моссбауэра. Движение источника разрушает резонансное поглощение

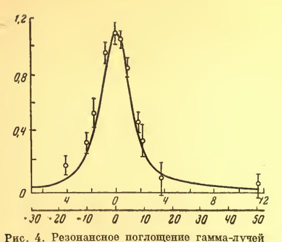


Рис. 4. Резонансное поглощение гамма-лучей Ir^{191} при различных скоростях источника

Сплошная линия — теоретическая зависимость. Верхняя шкала — скорость источника (*см/сек*). Нижняя шкала — доплеровский сдвиг энергии (10^{-6} *эв*). По вертикали — вероятность поглощения

до температуры жидкого азота. Тогда при увеличении линейной скорости обода свыше ~ 4 *см/сек* (!) резонансное поглощение разрушается из-за доплеровского изменения энергии кванта; то же происходит при обратном движении источника. Из рис. 4 видно, что вероятность резонансного поглощения значительна в области изменения скорости на ± 2 *см/сек*. Это значит, что возбужденный энергетический уровень не бесконечно узок, а имеет конечную ширину Γ, по порядку величины равную $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ *эв* (см. нижнюю шкалу на рис. 4).

Ширина энергетического уровня и время жизни возбужденного состояния ядра

Конечная ширина спектральной линии может объясняться рядом причин.

Во-первых, тепловое движение атомов вызывает хаотическое доплеровское смещение частоты. Это тепловое расширение линии использовали (до Моссбауэра) для

наблюдения резонансного поглощения гамма-лучей. Для этого источник (в газообразном состоянии) сильно нагревали. При нагревании источника небольшая часть атомов имела настолько большие скорости, что допплеровское увеличение энергии квантов (если движение атома происходило по направлению к поглотителю) компенсировало потери энергии на отдачу, и резонансное поглощение оказывалось возможным.

Во-вторых, магнитное и электрическое взаимодействия ядер с электронной оболочкой, окружающей ядро, могут изменить энергию ядра. Если эти воздействия происходят с различной силой, то каждый уровень расщепится на ряд очень близко расположенных уровней. Как мы увидим дальше, резонансное поглощение гамма-лучей дало возможность наблюдать это расщепление.

Однако даже когда все эти «внешние» воздействия пренебрежимо малы, все же наблюдается «естественная» ширина спектральных линий. Эта наименьшая ширина Γ, согласно основному положению квантовой теории, связана с периодом полураспада возбужденного состояния ядра $T_{1/2}$, т. е. со временем, в течение которого половина возбужденных ядер превратится в невозбужденные (за счет испускания гамма-кванта). Соотношение между Γ и $T_{1/2}$ гласит:

$$\Gamma \cdot T_{1/2} \approx \frac{h \cdot 0{,}69}{2\pi},$$

где h — постоянная Планка.

Измеряя ширину линии Γ, по методу Моссбауэра можно вычислить период полураспада первого возбужденного состояния ядра. Для Ir^{191} $\Gamma \approx 6{,}2 \cdot 10^{-6}$ *эв*, следовательно, $T_{1/2} \approx 0{,}7 \cdot 10^{-10}$ сек., что хорошо согласуется с прямыми измерениями $T_{1/2}$, выполненными при помощи сцинтилляционных счетчиков и высокочастотных электронных схем. Такое совпадение результатов показывает, что в данном случае энергетическая ширина линии близка к «естественной» ширине, т. е. что расширение линии из-за теплового движения и внешних воздействий отсутствует.

Большие возможности нового метода

Проявление резонансного поглощения при устранении отдачи (за счет связи с кристаллической решеткой) получило название «эффекта Моссбауэра».

Эффект Моссбауэра открыл новые неожиданные возможности для постановки опытов в самых различных областях физики. Речь идет о тех опытах, где надо отмечать ничтожные изменения частоты, которые вызваны внешними воздействиями. Действительно, достаточно изменить частоты на такую величину $\Delta\nu$, что энергия кванта изменится на ΔE большее, чем ширина линии $\Gamma(\Delta E > \Gamma)$, чтобы резонансное поглощение исчезло. Его можно восстановить, если скомпенсировать изменение ΔE за счет допплерова эффекта (движением источника). Относительная ширина гамма-лучей (Γ/E) может быть очень малой: например, для Ir^{191} $\Gamma = 6 \cdot 10^{-6}$ *эв*, а энергия квантов $E = 129$ тыс. *эв*. Следовательно, $\Gamma/E \approx 5 \cdot 10^{-11}$. Поэтому изменение энергии (или частоты) гамма-кванта больше, чем на $5 \cdot 10^{-9}$ %, устранит резонансное поглощение.

Еще бо́льшие возможности для регистрации малых изменений энергии представляет изотоп железа Fe^{57}. После бета-распада кобальта Co^{57} ядро Fe^{57} часто образуется в первом возбужденном состоянии с энергией 14,4 *кэв*. Время жизни этого состояния около $1 \cdot 10^{-7}$ сек., так что «естественная» ширина линии Γ должна быть значительно меньшей, чем для Ir^{191}, а именно $\sim 4{,}6 \cdot 10^{-6}$ *эв*. Таким образом, относительная ширина линии $\Gamma/E \approx 3{,}2 \cdot 10^{-11}$%. Малая величина энергии квантов в Fe^{57} обусловливает малую энергию отдачи ($\Delta E_{отд} \approx 0{,}002$ *эв*), что повышает вероятность излучения и поглощения квантов без передачи энергии кристаллической решетки. Поэтому оказалось возможным все опыты с Fe^{57} проводить при комнатной температуре. Опыт и теория показывают, что при этом до 70% (!) квантов излучаются без отдачи.

Измерение гравитационного смещения

Сразу же после открытия эффекта Моссбауэра несколько групп физиков (в СССР, Англии, США) предложили использовать его для измерения смещения частоты гамма-лучей при их движении в поле земного тяготения.

Какие же изменения частоты квантов нужно отметить? Оказывается, они очень малы: порядка $2 \cdot 10^{-13}$%.

Действительно, по принципу эквивалентности, лежащему в основе общей теории относительности, поле тяготения действует на все тела с силой, пропорциональной их инертной массе. Иначе говоря, все тела притягиваются

одинаково, если их массы равны. Масса кванта равна $m = \frac{h\nu}{c^2}$. Следовательно, проходя путь l вверх, квант совершит работу $mgl = \frac{h\nu gl}{c^2}$, где g — ускорение силы тяжести. Относительное изменение энергии (и частоты) $\Delta E/E = \Delta\nu/\nu = \frac{h\nu \cdot gl}{h\nu \cdot c^2} = gl/c^2$. Расстояния l не могут быть больше, скажем, 20 метров (иначе надо будет брать очень сильные источники гамма-лучей). Поэтому $gl/c^2 \approx \approx 2\cdot10^{-15} = 2\cdot10^{-13}\%$ [3].

Как мы видим, это изменение частоты значительно меньше (приблизительно в 100 раз), чем относительная естественная ширина гамма-линии. Но и такой небольшой сдвиг физики смогли надежно измерить.

Первые измерения были выполнены группой английских физиков (Крэншоу, Шиффер, Уайтхед), которые нашли, что измеренное ими гравитационное «красное» смещение равнялось $0{,}96 \pm 0{,}45$ от теоретического значения, предсказываемого принципом эквивалентности. Однако вопрос оказался значительно более сложным, так как они не учли возможного влияния температуры на наблюдаемый эффект. Другими авторами было показано, что разница на 1° в температурах источника и поглотителя может вызвать смещение частоты того же порядка, что и гравитационный сдвиг. Так как температура источника и поглотителя в опыте английских физиков не контролировалась, то их результат не является доказательным.

Принцип эквивалентности подтвержден

Паунд и Ребка предприняли измерение гравитационного сдвига, уделив особое внимание поддержанию одинаковой температуры источника и поглотителя.

Чтобы лучше заметить небольшой сдвиг максимума кривой резонансного поглощения (эта кривая имеет вид, сходный с изображенной на рис. 4, но соответственно более узкая), Паунд и Ребка измеряли число импульсов, когда источник двигается либо вверх, либо вниз с постоянной скоростью. Скорость выбиралась из расчета, чтобы она

[3] Мы вывели величину гравитационного смещения частоты, предполагая справедливость квантовой теории света. Однако тот же результат может быть получен и без этого допущения.

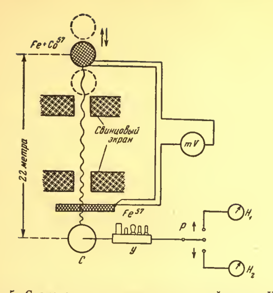


Рис. 5. Схема опыта для измерения веса фотонов. Источник движется то вверх, то вниз. Одновременно реле P переключает контакты так, что нумератор H_1 считает импульсы, когда источник идет вверх, а H_2 — когда источник идет вниз. Термопары, соединенные с милливольтметром mV, измеряют разность температур источника и поглотителя. C — счетчик квантов, y — усилитель

соответствовала наиболее круто и линейно спадающим участкам кривой (рис. 4). В этом случае небольшое смещение центра кривой приведет к заметному увеличению счета при движении в одном направлении и, соответственно, к уменьшению счета для противоположного движения источника. В опыте (см. схему на рис. 5) источник и поглотитель располагались на расстоянии 22 *м* по вертикали, причем для исключения систематических ошибок источник и поглотитель часто меняли местами (знак изменения частоты при этом, естественно, изменялся).

Были приняты специальные меры для того, чтобы обеспечить одинаковость физических условий для ядер источника и поглотителя.

Испускание квантов происходит в ходе распада материнского изотопа: например, гамма-линия Fe^{57} испускается после бета-распада Co^{57}. Следовательно, образую-

щееся ядро Fe^{57} находится в источнике в окружении кобальта, и силы, действующие на ядра Fe^{57} в источнике и в поглотителе, различны. Поэтому оказалось необходимым ввести ядра Co^{57} внутрь железа. Это достигается путем нагревания железа с нанесенным тончайшим слоем Co^{57} до температуры 800°. Атомы кобальта диффундируют внутрь железа, и образующиеся при распаде ядра Fe^{57} оказываются практически в одинаковом состоянии с ядрами поглотителя.

Многомесячные круглосуточные измерения с частыми калибровками аппаратуры и контрольными опытами обнаружили, что изменение частоты гамма-лучей на высоте 22 *м* составляет $(2{,}34 \pm 0{,}10)\cdot 10^{-13}$, что в пределах точности опыта согласуется с предсказываемым принципом эквивалентности. Авторы продолжают измерения с целью увеличить точность результата.

Таким образом, можно считать установленным, что эффективная масса квантов света (фотонов) и их вес связаны тем же коэффициентом пропорциональности, что и инертная масса и вес для материальных тел.

Надо отметить, что подтверждение принципа эквивалентности не является доказательством справедливости общей теории относительности в целом. Дело в том, что эта теория является обобщением принципа эквивалентности на случай произвольных (в частности и очень больших) гравитационных полей. Она предсказывает ряд эффектов, которые могут быть проверены на опыте. С одним из них — гравитационным смещением частоты света — мы уже познакомились. Второе явление — изменение направления световых лучей, проходящих вблизи солнечного диска. Оно также было подтверждено на опыте. Смещение перигелия Меркурия и других планет также может считаться в настоящее время доказательством правильности выводов фундаментальной теории Эйнштейна. Однако наблюдаемые эффекты очень малы. Кроме того, они получены из астрономических наблюдений, а не в лабораторных условиях.

Эффект Моссбауэра поможет изучать строение кристаллов

Мы уже видели, что наблюдение резонансного поглощения гамма-лучей возможно только благодаря тому, что радиоактивные ядра находятся в составе кристалли-

ческой решетки. Свойства кристаллов влияют на вероятность эффекта Мессбауэра, на энергетическую ширину гамма-линий. Магнитные и электрические поля, возникающие внутри кристаллической решетки из-за движения электронов, приводят к изменению энергии (расщеплению) возбужденных уровней ядра, и, следовательно, к изменению энергии гамма-квантов.

Наблюдение всех этих эффектов, в свою очередь, позволяет лучше понять строение кристаллов, так что этот метод предоставил в руки экспериментаторов совершенно новые возможности.

Ранее мы уже говорили о том, что доля квантов, излученных без отдачи, зависит от характера спектра возможных колебаний в кристаллической решетке. Можно вычислить эту зависимость, используя теорию кристаллической решетки, развитую Дебаем. Неполное согласие опытных данных с теорией указывает на несовершенство теории.

Можно надеяться, что дальнейшие более точные опыты помогут изучить форму спектра возможных колебаний кристаллической решетки и построить ее правильную теорию.

Магнитные моменты ядер и внутреннее магнитное поле в кристаллах

Почти все элементарные частицы, кроме электрического заряда (если они его имеют), обладают еще магнитным моментом, т. е. их можно уподобить маленьким магнитикам. Атомные ядра состоят из протонов и нейтронов, обладающих магнитными моментами. По величине и знаку магнитного момента данного ядра можно судить о его строении. Поэтому определение магнитных моментов ядер представляет большой интерес. Однако до сих пор эти измерения удавалось проводить в основном только для невозбужденных состояний ядер. Метод Мессбауэра открывает новые возможности для измерения магнитных моментов первых возбужденных состояний.

Во внешнем магнитном поле магниты ориентируются в направлении поля. То же самое происходит с магнитными моментами ядер. Однако из-за квантового характера взаимодействия магнитные моменты ядер занимают ряд

определенных положений относительно направления магнитного поля. Каждое такое направление соответствует определенной энергии взаимодействия ΔE магнитного момента ядра μ с полем $H(\Delta E = \mu H \cos \alpha$, где α — угол между μ и H; α принимает определенные значения.) Эта энергия ΔE добавляется к энергии возбужденного уровня E.

Таким образом, благодаря взаимодействию магнитного момента ядра с полем уровень расщепляется на несколько подуровней с близкими энергиями. Число этих подуровней определяется квантовыми свойствами возбужденного состояния (его спином).

Если магнитное поле мало, то расщепление оказывается меньше, чем ширина уровня Γ, т. е. эта ширина лишь немного увеличивается. Однако при малых Γ и больших H вместо одной гамма-линии будут испускаться несколько линий с измененными частотами. Это изменение частоты может быть замечено по уменьшению резонансного поглощения.

Советские физики А. И. Алиханов и В. А. Любимов одними из первых наблюдали это уменьшение для случая гамма-излучения изотопа олова Sn^{119} (энергия квантов $E = 23{,}8$ *кэв*, ширина уровня Γ — $2{,}4 \cdot 10^{-8}$ *эв*). Более подробно этот вопрос исследовался И. Я. Баритом, Ф. Л. Шапиро, Н. Н. Делягиным, В. С. Шпинелем и др., а также французскими физиками. Надо надеяться, что эти измерения позволят определить магнитный момент первого уровня Sn^{119}. Имеются указания и на то, что неоднородное электрическое поле внутри кристаллической решетки также приводит к расщеплению уровней.

Однако наиболее интересные результаты были получены с уже известным нам изотопом железа Fe^{57}. Железо и многие его соединения являются ферромагнитными, и внутри кристаллов имеется очень большое внутреннее магнитное поле, достигающее нескольких сотен тысяч эрстед. Если первое возбужденное состояние имеет магнитный момент, не равный нулю (μ для основного состояния известно), то произойдет сложное расщепление уровней во внутреннем магнитном поле: верхний уровень разобьется на четыре подуровня, нижний — на два. Между этими уровнями будут возможны шесть гамма-переходов с различными энергиями. Это приведет к сложной картине зависимости резонансного рассеяния от скорости

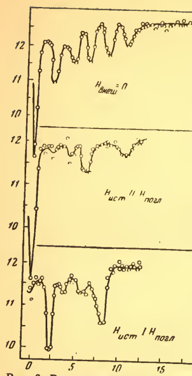


Рис. 6. Расщепление уровней Fe^{57} под действием магнитного поля. Минимумы интенсивности (при измерении скорости источника) соответствуют совпадению сдвинутых уровней источника с уровнями поглотителя. Верхняя кривая — ненамагниченное железо ($H_{внешн} = 0$). На нижних кривых внешние поля в источнике и поглотителе соответственно параллельны или перпендикулярны. По вертикали — относительное число импульсов

движения источника (рис. 6, верхняя кривая)[4]. Из рисунка видно, что, кроме основной линии, с каждой ее стороны наблюдается еще пять минимумов интенсивности (т. е. максимумов поглощения). Эту картину следует интерпретировать следующим образом. При небольшой относительной скорости поглощение уменьшается, так как все компоненты, испущенные источником, будут отличаться по энергии от соответствующих резонансных энергий в поглотителе.

Однако при дальнейшем возрастании скорости одни компоненты начинают совпадать по энергиям с другими и поглощение снова возрастет. Из теории следует, что всего должно быть семь максимумов поглощения для каждого направления скорости, однако два из них настолько слабы, что их нельзя обнаружить.

Оказалось, что направление внутреннего поля тесно связано с направлением внешнего магнитного поля, в которое помещают источник и поглотитель Если поля, в которых находятся источник и поглотитель, параллельны друг другу, то сильнее проявляются одни из максимумов поглощения для Fe^{57}, в то время как при

[4] Паунд и Ребка при измерениях гравитационного смещения использовали центральный максимум поглощения (при $v \approx 0$).

перпендикулярности полей — другие. Это видно из двух нижних кривых рис. 6. Все эти данные помогли полностью расшифровать картину расщепления уровня Fe^{57}, точно определить величину магнитного момента первого возбужденного состояния и вычислить величину внутреннего магнитного поля в месте расположения ядра Fe^{57}. Это поле оказалось равным 330 *кэ*. Были измерены магнитные поля и в других соединениях железа, а также измерено взаимодействие с неоднородным электрическим полем в кристалле.

Неожиданный результат был получен, когда попытались определить, каким же образом ориентируются внутренние поля по отношению к внешнему полю. Оказалось, что во внешнем магнитном поле напряженностью 20 *кэ* расстояния между максимумами (на рис. 6) уменьшились приблизительно на 5%. Это указывает на то, что внутреннее магнитное поле направлено противоположно внешнему, так что внешнее поле ослабляет поле, действующее на ядро.

Внутреннее поле уменьшается с повышением температуры по тому же закону, что и магнитная проницаемость железа, и стремится к нулю при приближении к точке Кюри (при температуре большей, чем точка Кюри, железо становится парамагнетиком).

Этот результат поможет установить природу внутреннего магнитного поля в ферромагнетиках.

Здесь рассказано лишь о некоторых, наиболее важных результатах, полученных благодаря применению нового метода для изучения твердого тела. В научной литературе все время публикуются новые работы на эту тему.

Дальнейшие перспективы

Следует ожидать, что в ближайшие несколько лет интерес физиков к эффекту Моссбауэра сохранится и будут проделаны новые интересные опыты. Уже сейчас делаются попытки достигнуть еще больших точностей, чем это возможно с Fe^{57}. Речь идет о гамма-излучении Zn^{67} с энергией 93 *кэв*. Из-за большего периода полураспада ($T_{1/2} = 9{,}4 \cdot 10^{-6}$ сек.) эта линия должна обладать относительной шириной всего $5 \cdot 10^{-14}$%. Однако сравнительно большая энергия квантов приводит к малой вероятности из-

лучения без отдачи, даже несмотря на глубокое охлаждение. Кроме того, при столь малой ширине линии оказывается очень существенной тождественность условий для излучающего и поглощающего ядер. Эти трудности были преодолены группой советских физиков в Дубне (Ф. Л. Шапиро и др.), которым удалось наблюдать резонансное поглощение гамма-лучей Zn^{67}. Кажутся вполне осуществимыми новые тонкие опыты по проверке предсказаний общей теории относительности.

Однако, по-видимому, наиболее продолжительное время интересы ученых будут сосредоточены в области физики твердого тела и химии.

По ту сторону абсолютного нуля*

Доктор физико-математических наук
Д. А. Франк-Каменецкий

Всем известно, что температура, измеренная в обычных шкалах Цельсия, Реомюра или Фаренгейта, может быть как положительной, так и отрицательной, так как нулевая точка у этих шкал была выбрана их авторами произвольно. Развитие термодинамики позволило В. Томсону (лорду Кельвину) установить абсолютную шкалу температур. Для В. Томсона нуль этой шкалы был абсолютным нулем температуры (как его обычно и называют).

По представлениям творцов термодинамики, температура не могла быть ниже абсолютного нуля. Это утверждение носило столь принципиальный характер, что в прошлом столетии говорить о температуре ниже абсолютного нуля казалось бы просто бессмысленным. Отрицательная абсолютная температура с этой точки зрения представлялась такой же логической бессмыслицей, как, скажем, «круглый квадрат» или «живой мертвец».

Но развитие науки иногда приводит к новым взглядам, и понятия, ранее представлявшиеся бессмысленными, получают конкретный смысл. Классическим примером из основ математики может служить понятие корня квадратного из отрицательного числа. Еще недавно можно было прочесть в школьном учебнике алгебры, что «корень четной степени из отрицательного количества извлечь нельзя». Казалось, что само понятие о таком корне бессмысленно, что таких чисел нет — их и называли «мнимыми числами». Но вот появилась новая точка зрения на

* «Природа», 1960, № 3.

число. И в этом обобщенном понятии о числе мнимые числа нашли свое место, оказались мощнейшими орудиями математического анализа.

Нечто похожее происходит на наших глазах с понятием температуры. Перелистывая научные журналы последних лет, можно нередко наткнуться на слова «отрицательная температура», причем под этим подразумевается именно температура ниже абсолютного нуля — понятие, которое со старой термодинамической точки зрения было лишено всякого смысла. Это представление об отрицательных абсолютных температурах оказалось крайне плодотворным и получило приложения, имеющие большое научное и практическое значение.

Причины, по которым в современной физике стало возможно говорить об отрицательной абсолютной температуре, двоякого рода. В некоторой степени они связаны с переходом от классической физики к квантовой. Но основная причина заключается в расширении самого понятия температуры. Если ранее оно выводилось из термодинамики, то теперь оно строится на более широкой базе статистической физики или, как ее называют физики-теоретики, «статистики».

Температура в термодинамике и статистике

Термодинамика рассматривала тела привычных для нас размеров, не вникая в детали их атомного и молекулярного строения. Температура в термодинамике есть величина, определяющая направление перехода тепла: тепло самопроизвольно переходит от тела с более высокой температурой к телу с более низкой.

В простейших случаях температура оказывается пропорциональной средней энергии теплового движения частиц вещества, но это никак не есть определение температуры и даже не ее основное свойство. Более общее определение температуры дает статистическая физика. Она утверждает, что температура есть величина, характеризующая распределение энергии между частицами вещества. В каждой, даже самой малой с обычной точки зрения, части любого тела содержится громадное число частиц — молекул и атомов. Они имеют самые различные энергии. Но при данной положительной температуре чис-

ло частиц с очень большой энергией мало́, и притом тем меньше, чем ниже температура.

Представим себе, что мы пересчитали все частицы вещества, имеющие очень большую энергию E_2, и частицы с нормальными энергиями E_1. В обычном состоянии с положительной температурой (или, как говорят, в состоянии термодинамического равновесия) число частиц, обладающих меньшей энергией E_1, будет во много раз больше, чем число частиц, имеющих большую энергию E_2[1]. Отношение этих чисел столь велико и столь быстро увеличивается с возрастанием энергии E_2, что от него удобно взять логарифм (натуральный). Разделив разность энергий E_2 и E_1 на этот логарифм, мы и получим то, что со статистической точки зрения есть абсолютная температура. Правда, эта температура выражена не в обычных единицах (не в градусах), а в единицах энергии. Но умножив на постоянный переводный множитель, легко пересчитать температуру в градусы Цельсия. В современной атомной физике энергии частиц принято выражать в электронвольтах (*эв*). В тех же единицах физики выражают и температуру. Для перевода в обычные единицы достаточно знать соотношение 1 *эв* = 11 600° С.

Легко понять, почему такую теорию называют статистической. Чтобы найти распределение частиц по энергиям, пришлось пересчитать частицы — произвести нечто вроде «переписи населения». При этом, как и во всякой статистике, определенные соотношения получаются только при условии, если общее число частиц достаточно велико. Таким же образом мы не узнали бы ничего определенного, если бы по населению одной квартиры пытались найти распределение людей по возрастам. Но в масштабе целого города возрастной состав населения оказывается вполне определенным.

Поясним нагляднее, что значит логарифмическая связь между энергией и числом частиц с этой энергией. Если энергия меняется в арифметической прогрессии, то число частиц — в геометрической, и тем быстрее, чем ниже температура.

Так, если температура равна 1 *эв*, то это значит, что

---

[1] Дело усложняется, если у частицы есть много состояний с одинаковой энергией, например если речь идет об энергии поступательного движения; но такие случаи нас здесь интересовать не будут.

при увеличении энергии на 1 *эв* число частиц, обладающих этой энергией, уменьшится в 2,72 (число e — основание натуральных логарифмов) раэа. При температуре в 0,5 *эв* той же раэности энергий будет отвечать уменьшение числа частиц в $(2{,}72)^2$ раза и т. д.

Такой закон распределения энергии действует в состоянии равновесия. Если выдерживать тело достаточно долго при данной температуре, то между его частицами произойдет обмен энергией, который в конце концов приведет обязательно к состоянию равновесия. Термодинамика занималась только состоянием равновесия, поэтому в термодинамике отрицательная абсолютная температура не имела смысла. Статистическая физика позволяет в известных пределах распространить понятие температуры и на неравновесные состояния.

Температура в классической и квантовой физике

Другое изменение в нашем понимании температуры свяэано с переходом от классической физики к квантовой. В старой классической физике считалось, что каждая частица вещества может принимать непрерывный ряд различных состояний. Это делало статистическое истолкование температуры довольно сложным и запутанным. Современная квантовая физика нашла много случаев, когда энергии разных состояний различаются на конечную величину (квант). В квантовой физике имеет полный смысл говорить о частице, имеющей ограниченное число возможных состояний и, в частности, даже всего два состояния с различными эначениями энергии. Именно для таких чисто квантовых случаев и получает определенный смысл понятие об отрицательной абсолютной температуре.

Отрицательные абсолютные температуры в статистике

Уровни энергии частицы принято изображать на диаграмме (рис. 1). Каждый уровень энергии соответствует определенному состоянию *частицы* (а не всего тела!). Пусть рассматриваемое тело состоит из частиц с двумя значениями (уровнями) энергии. Чем больше энергия, тем выше на диаграмме уровень, который соответствует данному состоянию. Поэтому уровень с большей энергией на-

зывается **верхним**, с меньшей энергией — **нижним**. В состоянии равновесия на верхнем уровне **меньше** частиц, чем на нижнем, или, как говорят, населенность верхнего уровня меньше. Это **нормальная** зависимость числа частиц от энергии. Представим себе теперь, что мы искусственно смешали частицы с разными энергиями так, чтобы населенность верхнего уровня оказалась **больше**, чем нижнего. Мы получим состояние тела с обратной зависимостью числа частиц от энергии. По точному смыслу статистического определения температуры, подобному состоянию должна приписываться **отрицательная абсолютная температура** (рис. 2).

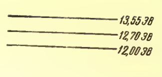


Рис. 1. Уровни энергии атома водорода

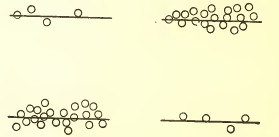


Рис. 2. Населенность уровней при положительной и отрицательной температурах

А что же с термодинамикой?

Как связать понятие отрицательной абсолютной температуры с привычными представлениями термодинамики?

Мы привыкли, что, сообщая телу тепло, мы повышаем его температуру. Но это утверждение имеет неограниченную справедливость только при неограниченном числе уровней энергии. Если число уровней энергии ограничено, то, сообщив телу конечное количество энергии, можно привести его в такое состояние, чтобы населенности всех уровней были одинаковы. Сделать это, конечно, можно только в неравновесных условиях. Но раз это удалось сделать, то такому состоянию отвечает бесконечная температура. Если нам удастся сообщить телу еще больше энергии, то на верхнем уровне окажется больше частиц, чем на нижнем, т. е. тело перейдет в состояние с отрицательной температурой.

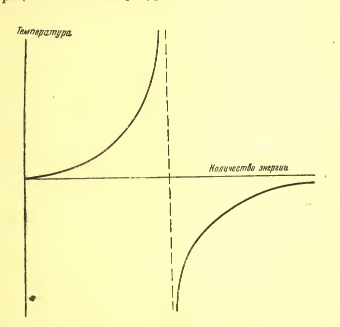


Рис. 3. Зависимость между количеством энергии и температурой при двух уровнях энергии

Таким образом, переход от положительной температуры к отрицательной происходит через бесконечность. В этом смысле можно сказать, что отрицательная абсолютная темпертура есть температура выше бесконечности (рис. 3). С этим согласуется и термодинамическое поведение тела с отрицательной температурой: оно стремится отдать свою избыточную энергию совершенно независимо от того, находятся ли с ним в контакте более холодные тела, способные эту энергию принять. Если в области положительных температур энергия передается от более горячего тела к более холодному, то в области отрицательных температур она безвозвратно испускается в виде излучения.

Неравновесность и переходы

Состояние с отрицательной температурой есть состояние неравновесное. Если тело предоставлено самому себе, то длительность существования такого состояния ограничена. В том случае, когда частицы обмениваются энергией быстро, отрицательная температура будет существовать лишь краткий миг.

Если по тем или иным причинам обмен энергией между частицами затруднен, неравновесное состояние может длиться дольше.

В конечном счете, если нет притока энергии извне, это состояние должно необратимо перейти в равновесное с положительной температурой. На этом переходе в равновесное состояние и основано практическое значение состояний с отрицательной температурой. Они позволили разработать новые способы генерации и усиления электромагнитных волн. При переходе молекулы или атома с верхнего уровня энергии на нижний испускается квант излучения. Система с отрицательной температурой обладает запасом энергии, которую она может испустить в виде электромагнитных волн. Это испускание может быть самопроизвольным (спонтанным) — тогда мы будем иметь молекулярный генератор. Оно может быть вызвано импульсом излучения той же частоты (вынужденное или индуцированное испускание). На этом основан усилитель с использованием отрицательной температуры.

Вынужденное испускание

Поясним подробнее, что́ такое вынужденное испускание, на котором основано действие молекулярных усилителей. Закон индуцированного испускания — один из наиболее общих выводов квантовой теории излучения. Согласно квантовой теории, электромагнитное излучение (свет, радиоволны) может рассматриваться как поток квантов или фотонов. Чтобы частица вещества могла взаимодействовать с излучением, среди ее уровней энергии должны быть два таких, разность которых равна энергии кванта. Если фотон столкнется с частицей, находящейся на нижнем из этих уровней, она может его поглотить. Частица же, находящаяся на верхнем уровне, при столкновении с фотоном, напротив, и с п у с т и т еще один такой же точно фотон, причем вероятности того и другого процесса точно одинаковы. Неизбежность процесса вынужденного испускания была выведена еще в 1919 г. Эйнштейном из общих статистических соображений, которые привели в дальнейшем к созданию индийским физиком Бозе первого варианта квантовой статистики — так называемой статистики Бозе—Эйнштейна. В дальнейшем Дирак получил закон вынужденного испускания уже из детального механизма взаимодействия излучения с веществом.

Молекулярные генераторы и усилители впервые были созданы советскими учеными Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым, удостоенными за эту работу Ленинской премии. В дальнейшем метод усиления электромагнитных волн при помощи отрицательных абсолютных температур был заимствован и широко развит в США, где получил название «мазер» (сокращение от английских слов Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation — микроволновое усиление посредством вынужденного испускания излучения).

Первоначально в приборах такого рода использовались уровни энергии молекул (например, аммиака); в дальнейшем широкое применение нашли уровни энергии электронов твердого тела. Однако этими приложениями не исчерпывается научное и практическое значение понятия отрицательной абсолютной температуры.

Спиновая температура

Наиболее прямой и однозначный смысл это понятие приобретает, если система имеет только два уровня энергии. Классическая физика не знала таких систем. В квантовой физике они есть. Простейшие частицы вещества — электроны, протоны, нейтроны — имеют собственный вращательный момент (спин), равный в квантовых единицах $^1/_2$.

Квантовая механика приводит к выводу, что подобная частица может по отношению к любой оси ориентироваться только двояким образом — так, чтобы проекция спина равнялась либо $+ ^1/_2$, либо $- ^1/_2$. Сколь ни странен этот вывод с точки зрения обычных наглядных представлений, он многократно подтвержден экспериментом. Со спином связан магнитный момент, и если имеется внешнее магнитное поле, то двум ориентациям спина отвечают два значения магнитной энергии. Частица, обладающая спином, ведет себя как элементарный магнитик. Во внешнем поле этот магнитик может устанавливаться либо по полю, либо против поля (рис. 4). Если магнитик повернулся каждым своим полюсом к соответственному полюсу внешнего поля ($+^1/_2$ на рисунке), то из-за отталкивания одноименных полюсов энергия будет больше. Состояние же, когда каждый полюс магнитика обращен к противоположному полюсу внешнего поля ($- ^1/_2$ на рисунке), будет нижним энергетическим состоянием. При температуре абсолютного нуля все магнитики расположатся энергетически выгодным образом; при положительной температуре тепловое движение выбьет часть их в менее выгодную ориентацию, но как бы мы ни повышали температуру — в состоянии равновесия эта часть никогда не будет больше половины. Если же неравновесным внешним воздействием перевести бо́льшую часть магнитиков в невыгодное (верхнее) состояние, то это будет отвечать отрицательной температуре (рис. 5).

Если спин равен $^1/_2$, то элементарный магнитик имеет только две возможные ориентировки во внешнем поле, и любое распределение этих магнитиков можно рассматривать, как соответствующее определенной температуре. Для этого достаточно разделить разность энергий на логарифм отношения числа частиц. Найденную таким образом величину называют спиновой темпера-

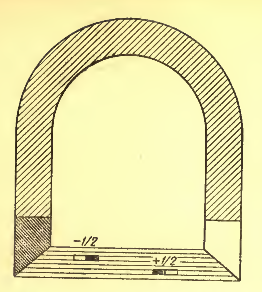


Рис. 4. Возможные ориентации спина в магнитном поле

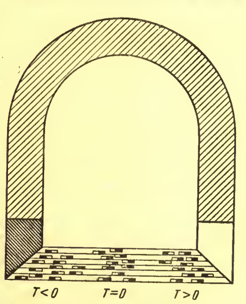


Рис. 5. Ориентация спинов при нулевой, положительной и отрицательной температурах

турой. Удобно иметь дело не со свободными электронами, а с атомами. Обычно в атоме (и в молекуле) большинство электронов располагается попарно, так что каждая пара состоит из противоположно направленных магнитиков, которые взаимно погашаются. Если в атоме есть один неспаренный электрон, то спин и магнитный момент всего атома определяются этим электроном. У такого атома будет два уровня энергии во внешнем магнитном поле и всегда определенная спиновая температура.

Как получить температуру ниже абсолютного нуля?

Для системы с двумя уровнями путь один: быстрым кратковременным импульсом электромагнитной волны перевести большую часть магнитиков на верхний уровень. Электромагнитная волна должна иметь определенную резонансную частоту, которая тем больше, чем сильнее магнитное поле. Эта частота определяется прямо из основного квантового закона: квант энергии волны должен быть равен разности энергетических уровней. Для этого частота должна быть такой же, как собственная частота вращения (прецессии) электрона в данном магнитном поле. При магнитных полях, с которыми удобно работать, она лежит в области сантиметровых радиоволн.

В системе с двумя уровнями импульс должен быть быстро оборван — иначе вынужденное испускание заставит магнитики вернуться на нижний уровень. Таким образом, если есть только два уровня, то состояние с отрицательной температурой может «жить» недолго. Но замечательный способ длительного поддержания отрицательных температур возникает в случае, если элементарный магнитик имеет больше двух возможных ориентировок в магнитном поле. Так бывает, если магнитиком служит атом с несколькими неспаренными электронами.

Такой атом в магнитном поле может иметь уже не два, а несколько уровней энергии. Переход между каждыми двумя из них снизу вверх требует своей определенной резонансной частоты. Будем непрерывно облучать нашу систему электромагнитной волной такой частоты, чтобы переводить магнитики с нижнего на самый верхний уровень. В этом случае волна вызывает вынужденные пере-

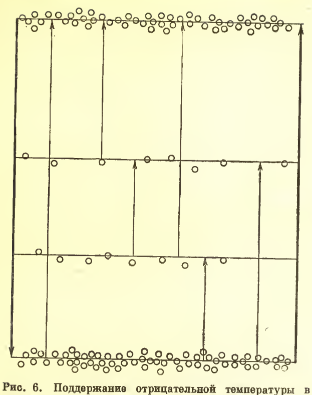


Рис. 6. Поддержание отрицательной температуры в системе с несколькими уровнями энергии. Тонкими стрелками показаны спонтанные, жирными — вынужденные переходы

ходы только обратно на нижний уровень, но не на промежуточные. Поэтому возникает такое распределение, когда велика населенность самого верхнего и самого нижнего уровней. Промежуточные уровни заселяются только за счет спонтанных (самопроизвольных) переходов с верхнего уровня, вероятность которых мала (рис. 6). Энергия в основном циркулирует между самым нижним и самым верхним уровнями за счет вынужденных переходов и лишь частично «просачивается» на промежуточные уровни за счет спонтанных переходов.

Если число уровней энергии больше двух, то неравновесное состояние не может уже быть полностью описано

одним значением температуры. Отношение населенностей для каждой пары уровней отвечает, вообще говоря, своей температуре. Так, на рис. 6 самый верхний уровень по отношению к самому нижнему может иметь сколь угодно высокую (в зависимости от мощности волны), но всегда положительную температуру. Промежуточные уровни по отношению к н и ж н е м у имеют также положительную и даже очень низкую температуру, но промежуточные уровни по отношению к в е р х н е м у обладают сильно отрицательной температурой, и она тем отрицательнее, чем мощнее волна. Если теперь одновременно с основной волной дать слабый сигнал меньшей частоты, соответствующей переходу с верхнего уровня на один из промежуточных, этот сигнал будет усиливаться.

Дальнейшие перспективы

Мы рассмотрели вопрос об отрицательных асболютных температурах на простейшем примере спиновой температуры. Это именно пример и притом простейший. Мы выбрали его потому, что он наиболее наглядно может пояснить те физические идеи, которые лежат в основе самого понятия отрицательной температуры. Возможные приложения этих представлений в науке и технике отнюдь не связаны специально со спиновыми уровнями энергии — они гораздо шире. Правда, наибольшие практические успехи в деле усиления радиочастотных сигналов связаны с использованием именно спиновых уровней энергии неспаренных электронов твердого тела. Примером может служить искусственный рубин, т. е. кристалл окиси алюминия, содержащий в качестве примеси атомы хрома, обладающие неспаренными электронами.

В самое последнее время удалось по принципу отрицательных температур осуществить усиление видимого света. При этом использовался либо тот же рубин, либо плазма газового разряда. Полученные результаты исключительно важны и интересны. К сожалению, объем настоящей статьи не позволяет нам подробно остановиться на них.

Отрицательная абсолютная температура, т. е. обратное распределение частиц по энергиям, — явление, которое научились осуществлять, изучать и использовать только в последние годы. Оно сулит еще много интересного.

Полупроводники*. Строение и применение

Член-корреспондент Академии наук СССР
Б. М. Вул

Изучение полупроводников было начато в СССР еще в 30-х годах по инициативе и под руководством академика А. Ф. Иоффе. В дальнейшем прогресс этой важной области знания, играющей ныне такую большую роль в науке и технике, в известной мере напоминает развитие ядерных исследований, только в меньшем масштабе и с запозданием примерно в десять лет. В 1948 г. случайно, в ходе изучения поверхностных явлений на полупроводниках, был открыт транзисторный эффект. После этого начался лавинообразный рост исследований, практических разработок, производства полупроводниковых приборов и материалов. За рубежом, главным образом в Соединенных Штатах Америки, этот бурный рост происходил на почве, щедро питаемой военными ведомствами.

Полупроводниковые кристаллы и методы их получения

Из полупроводников сейчас наиболее широко изучают и применяют германий и кремний. Летом 1962 г. на Международной конференции по полупроводникам почти половина докладов секции материалов была посвящена этим двум элементам. В конце 1962 г. начали интенсивно исследовать арсенид галлия[1] в связи с его использованием

* «Природа», 1963, № 10.

[1] За фундаментальные исследования, приведшие к созданию полупроводниковых квантовых генераторов, Б. М. Вулу, О. Н. Крохину, Ю. М. Попову, А. П. Шотову и др. присуждена Ленинская премия 1963 г. — *Прим. ред.*

для туннельных диодов [2] и созданием полупроводникового лазера; исследуются также и другие соединения элементов III и V групп таблицы Менделеева.

До настоящего времени для научных работ и практики применяют главным образом монокристаллы, причем монокристаллы весьма совершенные как в отношении химического состава, так и в отношении их структуры. Получить монокристаллы полупроводников, удовлетворяющие этим требованиям, очень трудно и сложно. После того как исчерпаны все методы химической очистки, дальнейшая обработка и получение монокристаллов производятся в специальных установках, главным образом по методу Чохральского, путем вытягивания монокристаллов или при помощи зонной плавки. Схема первой установки приведена на рис. 1. Затравка вырезается из монокристалла по определенному кристаллографическому направлению, в каком желательно вырастить слиток. Для хорошего перемешивания тигель, в котором расплавлен полупроводник, и затравка вращаются. Затравка очень медленно поднимается из расплава вверх, и таким образом из него растет монокристалл. Все это делается в вакууме или в атмосфере водорода либо нейтрального газа. Специальное приспособление позволяет в процессе вытягивания монокристалла вводить в расплав необходимые примеси.

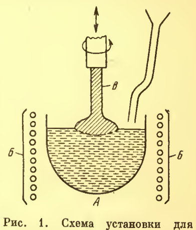


Рис. 1. Схема установки для вытягивания монокристаллов по Чохральскому

А — расплав; Б — нагревающая система; В — затравка

Схема зонной плавки приведена на рис. 2. Это сравнительно простое устройство. В трубке помещается стержень

[2] Туннельный диод — электронный прибор, принцип действия которого основан на туннельном эффекте — просачивании через потенциальный барьер электронов с энергией меньшей, чем высота барьера.

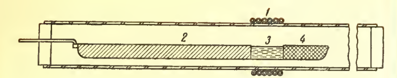


Рис. 2. Схема установки для зонной плавки

1 — нагревающая система; *2* — очищенная зона; *3* — расплавленная зона; *4*—неочищенная зона

из полупроводника, охватываемый тонким кольцевым нагревателем. Прогрев узкой зоны в стержне до плавления производится токами высокой частоты, быстрыми электронами, газовым разрядом или другим путем. При передвижении нагревателя расплавленная зона перемещается, и если растворимость примесей в жидкой фазе больше, чем в твердой, то они концентрируются в расплавленной зоне и вместе с ней уходят к концам стержня. Проделав эту операцию несколько раз, можно удалить из стержня те примеси, которые остались в нем после химической очистки. Когда растворимости примесей в твердом и жидком материале сильно различаются между собой, то этим путем можно достигнуть очень высокой степени очистки и вырастить совершенные монокристаллы.

Так как вытягивание монокристаллов из расплава производится в тиглях, то примеси из тиглей могут вновь проникнуть в расплав. Поэтому для германия пользуются тиглями из специального графита, для кремния — из кварца. Но естественный кварц все же загрязняет кремний, а искусственный кварц надо весьма тщательно очищать, и это представляет самостоятельную и довольно трудную задачу. Кроме того, кремний реагирует с кварцем, отбирая у него кислород. Поэтому кристаллы кремния, полученные по методу вытягивания, содержат еще около 10^{17} атомов кислорода в 1 *см*^{3}.

Даже метод зонной бестигельной плавки не всегда дает возможность избавиться от некоторых примесей. Например, бор одинаково растворяется в твердом и в жидком кремнии, и поэтому ни метод зонной плавки, ни метод вытягивания по Чохральскому не освобождают материал от него.

Требования, предъявляемые к монокристаллам, с течением времени все больше и больше возрастают. Сначала

считали достаточным, чтобы кристаллы были чрезвычайно чистыми, потом оказалось необходимой также и однородность электрических свойств, что очень существенно для производства полупроводниковых приборов.

В последнее время начали предъявлять более высокие требования в отношении плотности дислокаций [3] и научились делать бездислокационные германий и кремний. Эти кристаллы обладают удивительными механическими свойствами. Кремний — очень хрупкий материал, но стерженек из бездислокационного кремния легко сгибается почти под прямым углом.

В связи с тем, что выявилась известная перспектива применения полупроводников для лазеров, выдвинулось требование оптической однородности полупроводников. Не только удельное сопротивление полупроводника, но и его диэлектрическая проницаемость должны быть постоянными по всему слитку.

Естественно, что невозможно удалить из полупроводника все содержащиеся в нем примеси. Как упоминалось, в кремнии остается кислород в концентрации 10^{16}—10^{17} атомов в 1 *см*^{3}. Иногда примесь не приносит вреда, но в большинстве случаев отдельные примеси играют очень вредную роль; в частности, атомы благородного металла — золота ведут себя весьма «неблагородно» в кремниевых фотоэлементах, увеличивая скорость рекомбинации, а при более высокой скорости рекомбинации заметно уменьшается коэффициент полезного действия солнечных батарей. Но откуда берется в кремнии золото? Оказывается, что оно проникает в него из кварца при изготовлении батарей.

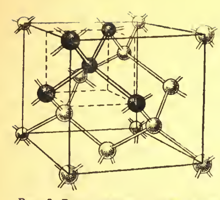
Не всегда любая примесь вредна. Например, для того чтобы изготовить из германия индикатор инфракрасного излучения, в него необходимо прибавить ничтожную примесь того же золота.

Химические связи в полупроводниках

Одна из главных задач в изучении полупроводников состоит в установлении связи между структурой, химическим составом и свойствами полупроводников. Большинство кристаллов, которые применяются в настоящее

---

[3] Дислокация — нарушение кристаллической решетки.



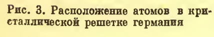


Рис. 3. Расположение атомов в кристаллической решетке германия

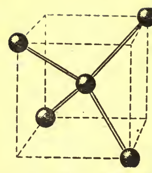


Рис. 4. Схема химической связи между атомами в кристалле германия

время — германий, кремний, соединения III и V групп периодической системы Менделеева,— имеют структуру алмаза. Расположение атомов в кристаллической решетке такого типа приведено на рис. 3. Здесь каждый из атомов связан со своими четырьмя соседями. Так как атомы обладают четырьмя валентными электронами, то связь между атомами осуществляется спаренными электронами, спины которых противоположны друг другу. Схема связи между атомами германия показана на рис. 4. Эта так называемая ковалентная связь довольно прочно скрепляет атомы. В германии ковалентная связь проявляется в чистом виде.

В сложных полупроводниках типа $A_{III}B_{V}$ (например, индий—сурьма) эта связь не имеет чисто ковалентного характера. В этом случае имеются два атома, из которых один относится к III, а другой — к V группе; электрон элемента V группы переходит к атому элемента III группы, и таким образом создаются два иона с противоположным электрическим зарядом и четырехэлектронной конфигурацией. Схема связи между ними показана на рис. 5. Здесь связь имеет смешанный ионно-ковалентный характер. Так как от характера связи зависят многие свойства полупроводника, то изучение ее природы представляет собой серьезную задачу, над которой работают физики и химики.

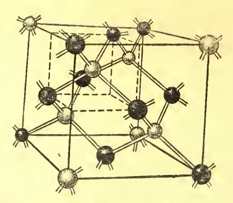


Рис. 5. Схема связи между атомами в кристал соединений типа $A_{III}B_{V}$

Доноры и акцепторы, электроны и дырки

Мы уже говорили, что требуется немало труда, чтобы получить чистый монокристалл. Но в действительности совершенно стерильные монокристаллы почти нигде не применяются. Полупроводник очищают от примесей для того, чтобы снова «загрязнить», но только заданной примесью с определенной концентрацией. Если внедрять в германий или кремний в качестве примеси атомы какого-либо элемента V группы, имеющего пять валентных электронов, то четыре из них примут участие в ковалентных связях с основными атомами полупроводника, а лишний, пятый электрон окажется слабо связанным со своим атомом. Не участвующий в валентных связях лишний электрон движется на сравнительно больших расстояниях от своего атома, так как сила связи между электроном и положительным остатком ослаблена вследствие большой диэлектрической проницаемости среды. Радиус электронной орбиты прямо пропорционален первой степени диэлектрической проницаемости ε, а энергия связи обратно пропорциональна ее квадрату; у германия $\varepsilon = 16$, и энергия связи лишних электронов у элементов V группы в германии составляет всего около 0,01 *эв*, в то время как у атома водорода энергия связи электрона с ядром равна 13,5 *эв*.

При комнатной температуре средняя энергия теплового движения атомов составляет 0,025 *эв*, и этого с избыт-

ком хватает для ионизации всех атомов примеси. Таким образом, каждый атом примеси V группы поставляет один свободный электрон, и концентрация таких электронов в полупроводнике примерно равна концентрации примесных атомов. Примеси, отдающие электроны, называют донорами.

Аналогичное явление происходит и с примесями III группы, только в этом случае каждый атом примеси захватывает по одному электрону, уподобляясь окружающим атомам полупроводника и оставляя ненасыщенной одну валентную связь, или так называемую дырку, в валентной зоне. Концентрация дырок равна примерно концентрации атомов III группы. Примеси, захватывающие электроны, называют акцепторами.

Электропроводность полупроводников

Полупроводники выделяют в особую группу материалов по их электрическим свойствам. Они отличаются от диэлектриков только тем, что энергия освобождения электронов внутри полупроводников значительно меньше, чем в диэлектриках. Так, например, в каменной соли она равна нескольким электронвольтам, а в германии — только 0,75 *эв*. Поэтому каменную соль считают диэлектриком, а германий — полупроводником. Поскольку можно находить или изготовлять материалы с разной величиной энергии связи, граница между полупроводниками и диэлектриками условна.

В полупроводнике и в диэлектрике электропроводность как свойство вещества возникает только при внешнем воздействии — облучении, нагреве. Проводникам же электропроводность свойственна сама по себе. Этим проводники качественно отличаются от диэлектриков и полупроводников.

В полупроводниках ток обусловлен движением электрона, а перемещение ионов, как правило, играет ничтожную роль. Электроны, освобожденные внешними воздействиями (так называемые свободные электроны), и валентно связанные электроны находятся в кристаллической решетке и в разных условиях, поэтому закономерности их движения в электрическом поле различны.

Приложим к полупроводнику электрическое поле. Новые энергетические состояния, занимаемые при этом

свободными электронами, будут характеризоваться преимущественным движением в направлении, соответствующем электрическому полю, что макроскопически будет проявляться как электрический ток.

Когда все валентные связи насыщены, то электроны, связывающие атомы, не могут в целом изменять свои состояния под действием электрического поля (если напряженность его недостаточно велика для возникновения ударной ионизации или туннельного эффекта). Если же некоторые валентные электроны под действием теплового движения или других причин удалены из зоны, то это открывает возможность остальным валентным электронам изменять свои состояния. Замещение свободных валентных связей, или так называемых дырок, происходит благодаря переходу валентных электронов от одного атома к другому. При отсутствии внешнего электрического поля эти переходы совершаются хаотично. Если же приложено внешнее поле, то оно вносит некоторую направленность в движение валентных электронов и соответственно в перемещение дырок. Последнее эквивалентно переносу положительного заряда, так как атом с незаполненной валентной связью представляет положительно заряженный ион. Существование дырок в том или ином месте свидетельствует о недостаче валентного электрона или избытке положительного элементарного заряда.

Поэтому движение совокупности всех валентных электронов можно в известных пределах описывать как перемещение пустых мест, или дырок этой совокупности, в противоположном направлении.

Если в полупроводнике содержатся оба типа примесей — и доноры и акцепторы, то они друг друга нейтрализуют, и активной является только их разность.

Полупроводник, у которого концентрация доноров (N_d) больше, чем концентрация акцепторов (N_a), называют электронным, а при $N_a > N_d$ — дырочным.

$p - n$-переходы и некоторые применения полупроводников

Если в одну часть полупроводника ввести донорную примесь, а в другую акцепторную, то в первой части можно создать значительную концентрацию свободных электронов, а в другой — дырок.

Благодаря диффузии электроны начнут перетекать в те места, где имеются дырки. Так как обе части были электрически нейтральны, то уход электронов из одной части эквивалентен оставлению в ней некомпенсированного положительного заряда, а переход в другую часть — переносу туда отрицательного заряда. Вследствие этого электронная часть полупроводника заряжается положительно, а дырочная — отрицательно и между обеими частями полупроводника устанавливается разность потенциалов достаточной величины, чтобы препятствовать диффузии электронов.

Диффузионная разность потенциалов зависит от типа полупроводника, характера и концентрации примесей в разных его частях и может достигать, например в германии, нескольких десятых вольта.

Область между двумя частями полупроводника, на которой главным образом сосредоточена эта разность потенциалов, называют электронно-дырочным или $p—n$-переходом (см. схему на рис. 6). Эти переходы играют существенную роль в большинстве полупроводниковых приборов: диодах, транзисторах, солнечных батареях, термоэлементах и др.

Все важнейшие исследования и применения полупроводников связаны с нарушением в них термодинамического равновесного состояния. Такое нарушение может быть вызвано различными внешними воздействиями: электрическим напряжением, излучением, нагревом и т. п.

В том случае, когда внутри полупроводника содержатся $p—n$-переходы, результаты таких воздействий проявляются особенно ярко, и полупроводники с $p—n$-переходами используют как выпрямители переменного тока в постоянный, усилители и генераторы высокочастотных колебаний, фотоэлементы для прямого преобразования энергии света в электрическую и термоэлементы для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую. В последнее время стали использовать полупроводники также и для обратного преобразования энергии электрического тока в излучение (в лазерах).

Область $p—n$-переходов в полупроводниковых приборах имеет практически толщину порядка нескольких микрон. Поэтому полупроводниковые приборы очень малы по сравнению с приборами, использующими электронные вакуумные лампы.

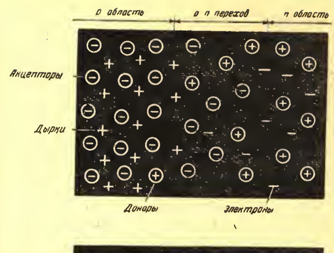




Рис. 6. Схема p—n-перехода

Применение полупроводников позволило создать миниатюрные радиоэлектронные устройства, как, например, карманные радиоприемники. Но полупроводниковые детали могут быть сделаны значительно меньше и практически сведены к размерам, немногим превышающим толщину области перехода. Это открывает для электронной техники возможность использовать уже не миниатюрные, а микроминиатюрные устройства и предвещает дальнейшее проникновение полупроводников во многие отрасли техники. Особенно важна микроминиатюризация для конструирования электронных вычислительных машин.

Полупроводники очень чувствительны к внешним воздействиям — электрическим, магнитным, тепловым, механическим, световым. Поэтому они находят широкое применение как датчики в автоматической и телемеханической аппаратуре.

В последнее время наметилось новое применение полупроводников в качестве генераторов механических коле-

баний высокой частоты. Давно известно, что если скорость движения тела в среде превышает скорость распространения звука в ней, то от движущегося тела, под определенным углом к нему, в среде расходятся волны. В полупроводниках, в отличие от металлов, легко можно довести в сравнительно небольших электрических полях направленную скорость электронов до величины, превышающей звуковую. Тогда электроны, заимствуя энергию от электрического поля, излучают ее в виде фононов — упругих колебаний среды, в которой они движутся. Таким простым методом удалось возбудить в сульфиде кадмия механические колебания с частотой в несколько миллионов периодов в секунду.

Большой практический интерес представляют полупроводниковые холодильные устройства, теория и конструкция которых были впервые разработаны у нас коллективом ученых и инженеров под руководством академика А. Ф. Иоффе. Весьма интересны с точки зрения теории, а также и практики магнитные явления в полупроводниках, в исследование которых выдающийся вклад внесли советские физики Я. И. Френкель, И. К. Кикоин, Е. К. Завойский и др. Но рассказ об этом выходит далеко за рамки нашей статьи.

По мере изучения полупроводников все шире раскрываются таящиеся в них практические возможности. Они далеко не исчерпаны и, несомненно, дальнейшие поиски на этом поприще увенчаются большим успехом.

Генераторы и усилители света*

Член-корреспондент Академии наук СССР

Н. Г. Басов,

кандидат физико-математических наук

О. Н. Крохин,

кандидат физико-математических наук

Ю. М. Попов

Инженер Гарин, герой фантастического романа А. Н. Толстого «Гиперболоид инженера Гарина», получил чрезвычайно тонкий нерасходящийся луч света. Плотность энергии в этом луче была настолько велика, что на расстоянии в несколько километров он разрезал бронированные корабли с такой же легкостью, как можно разрезать горячим ножом тонкий кусочек масла.

Источником света у инженера Гарина служили «пирамидки», горевшие ослепительно ярким белым пламенем, а для собирания света в тонкий луч применялась сравнительно простая система зеркал.

Современное развитие физики совсем недавно привело к созданию таких приборов, которые очень напоминают фантастический «гиперболоид инженера Гарина», т. е. дают остронаправленный пучок интенсивного монохроматического света. Осуществление таких приборов явилось результатом развития недавно возникшей новой отрасли физики — квантовой радиофизики. Один из таких генераторов изображен на рис. 1. Кусок кристалла синтетического рубина расположен между двумя строго параллельными плоскими зеркалами. Через одно зеркало может частично проходить свет. При освещении рубина вспышкой от мощной импульсной лампы излучается через полупрозрачное зеркало слаборасходящийся пучок практически монохроматического (красного) света. Мощ-

* «Природа», 1961, № 12.

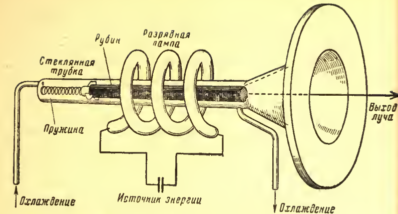


Рис. 1. Схема квантового генератора, основанного на рубине

ность этого пучка пока не так велика, как это было описано в романе А. Н. Толстого. Однако для того, чтобы получить ту же энергию в очень узком интервале частот, в котором сконцентрировано излучение генератора, необходимо нагреть тело до температуры в 10 миллиардов градусов, т. е. нужно иметь источник света в миллион раз более горячий, чем Солнце.

При помощи линз или других систем излучение оптического генератора может быть сфокусировано на площадку размером порядка длины волны излучения (приблизительно миллионной доли 1 *мм*^{2}). При этом получается настолько большая плотность энергии, что под действием этого пучка легко испаряется такое тугоплавкое вещество, как алмаз.

В настоящее время трудно определить, где начинается история квантовой радиофизики. Она базируется на законах квантовой механики. Историю можно начинать с открытий М. Планка и Н. Бора, благодаря которым стало ясно, что электромагнитные излучения испускаются и поглощаются не непрерывно, а отдельными порциями — квантами. Излучение и поглощение квантов происходит скачкообразно. Таким же образом происходит изменение внутренней энергии микрочастиц (атомов, молекул, электронов, ионов и т. д.). В большинстве случаев внутренняя энергия микросистем не может изменяться непре-

рывно, а принимает лишь строго определенные значения, называемые уровнями энергии. При переходе микрочастиц с уровня на уровень испускается или поглощается квант, частота которого определяется соотношением Бора

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h},$$

где ν — частота излучения, $h = 6{,}7 \cdot 10^{-27}$ *эрг/сек* — постоянная Планка, E_2 — энергия более высокого уровня, E_1 — энергия более низкого уровня.

В основе работы квантовых генераторов и усилителей лежит индуцированное излучение, которое было постулировано А. Эйнштейном в 1917 г. при изучении равновесия между атомными системами и излучением.

Однако индуцированное излучение не находило практического применения до 1954—1955 гг., когда были построены первые квантовые генераторы электромагнитных волн сантиметрового диапазона (молекулярные генераторы).

Еще в 1951 г. В. А. Фабрикант указал на возможность усиления света за счет индуцированного излучения. В 1952 г. независимо в трех странах был предложен новый принцип генерации и усиления электромагнитного излучения в квантовых системах, основанный на индуцированном излучении (СССР — Н. Г. Басов и А. М. Прохоров; США — Ч. Таунс, Дж. Гордон, Х. Цайгер; Канада — Дж. Вебер).

С 1955 г. развитие квантовой радиофизики происходит чрезвычайно быстро. Квантовые приборы «ставят рекорды» в различных областях науки и техники. Например, при помощи квантовых генераторов в настоящее время можно сконструировать часы, которые за десятки тысяч лет непрерывного хода будут «отставать» или «спешить» менее чем на одну секунду. Важное значение для науки и техники имеют также квантовые усилители сантиметрового и дециметрового диапазона волн, позволяющие в сотни раз повысить чувствительность приемной аппаратуры. Впервые такие усилители предложил Н. Блумберген в 1956 г. на основе так называемой трехуровневой схемы, исследованной Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым. Те же принципы, которые лежат в основе квантовых генераторов и усилителей сантиметровых и дециметровых волн, позволили создать генераторы в оптическом диа-

пазоне волн. Впервые такие приборы были предложены в 1958 г. (СССР — Н. Г. Басов, Б. М. Вул и Ю. М. Попов, А. Н. Прохоров; США — Ч. Таунс и А. Шавлов). Первый генератор оптического диапазона был сконструирован в конце 1960 г. (США — Т. Майман)[1].

В настоящее время во многих странах мира большие коллективы ученых ведут интенсивную работу по использованию различных квантовых систем для создания и усовершенствования генераторов и усилителей в большом диапазоне волн — от метрового до ультрафиолетового, а возможно, и более коротковолнового диапазона.

Взаимодействие излучения с веществом

Рассмотрим взаимодействие «микрочастицы» (например, атома) с излучением. Будем считать для простоты, что атом имеет два уровня энергии E_1 и E_2 ($E_2 > E_1$). Пусть атом первоначально находится на верхнем энергетическом уровне. Такой атом может самопроизвольно перейти на нижний уровень и излучить квант энергии $h\nu = E_2 - E_1$. Этот процесс называется спонтанным (самопроизвольным) излучением; он происходит при отсутствии квантов электромагнитного излучения.

Если на возбужденный атом (атом, находящийся на верхнем энергетическом уровне) падает квант частоты ν_1, близкой к частоте перехода атома (ν), то такой квант может заставить атом перейти на нижний уровень. При этом атом испустит квант частоты ν_1. Испущенный квант будет тождествен кванту, вызвавшему излучение (будет иметь ту же частоту, поляризацию и направление распространения). Этот процесс называется *индуцированным излучением*.

Если квант частоты ν_1 падает на атом, находящийся на нижнем энергетическом уровне, то он может быть поглощен, при этом атом перейдет на более высокий энергетический уровень. Этот процесс носит название *резонансного поглощения*. Вероятность индуцированного излучения точно равна вероятности резонансного поглощения. Поэтому поведение системы, состоящей из многих атомов, при взаимодействии с квантами опреде-

[1] За фундаментальные открытия, приведшие к созданию мазеров и лазеров, Н. Г. Басову и А. М. Прохорову присуждена Нобелевская премия за 1964 г. (*Прим. ред.*)

ляется числом частиц на верхнем и нижнем уровнях. Если на нижнем уровне находится больше атомов, то такая система будет поглощать кванты. Если же на нижнем уровне находится меньше частиц, чем на верхнем, то в такой системе индуцированное излучение будет преобладать над резонансным поглощением, и такая квантовая система будет усиливать падающее на нее электромагнитное излучение. В термодинамическом равновесии распределение частиц по энергетическим уровням определяется их тепловым движением. Вследствие соударений между частицами их внутренняя энергия меняется, и атомы переходят с уровня на уровень [2].

Формула Больцмана показывает, что чем выше температура (чем сильнее тепловое движение), тем больше частиц находится на более высоком энергетическом уровне. Однако на таком уровне всегда находится меньше частиц, чем на более низком. Поэтому квантовые системы, находящиеся в равновесии, всегда поглощают падающее на них излучение. В отсутствие внешнего излучения в равновесных системах происходит спонтанное излучение, которое обусловливает тепловое свечение нагретых тел.

Рассмотрим излучение квантовой системы, помещенной внутри замкнутой полости с отражающими излучение стенками (резонатор). В таком объеме могут возбуждаться электромагнитные колебания лишь строго определенных частот (собственные частоты резонатора), подобно тому, как происходят колебания закрепленной с двух концов струны. Как известно, струна в таком случае может колебаться на таких частотах, когда вдоль нее укладывается целое число полуволн. Аналогично можно представить себе, что и электромагнитное поле внутри металлического объема состоит из набора стоячих волн, имеющих узлы на стенках резонатора. Каждая из таких волн может возбуждаться независимо и носит название о с ц и л л я т о р а поля. Если размеры резонатора велики по сравнению с длиной волны излучения, то в та-

[2] Число частиц N_i на уровне с энергией E определяется формулой Больцмана

$$N_i = Ne^{\frac{-E_i}{kT}},$$

где k – $1{,}38 \cdot 10^{-16}$ *эрг/градус*, постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; N — число частиц в основном состоянии.

ком резонаторе всегда имеется большое число осцилляторов вблизи заданной частоты, они только отличаются друг от друга направлением распространения квантов.

Если квантовую систему поместить в резонатор, то тепловое излучение (вследствие спонтанных переходов) будет почти равномерно распределено по всем углам, т. е. найдется очень большое число осцилляторов, имеющих различные направления распространения квантов. Кроме того, вследствие взаимодействия между частицами, из которых состоит квантовая система, происходит расширение энергетических уровней. Поэтому атомы излучают не на строго определенной частоте, а в некотором спектральном участке (ширина спектральной линии). В этом же интервале возбудятся и осцилляторы поля в резонаторе. Таким образом, от обычных тепловых и люминесцентных источников света испускаются кванты с различными направлениями распространения и с различной частотой.

Состояния с отрицательной температурой

Квантовые системы, находящиеся в равновесии, при любой температуре могут лишь поглощать падающее на них излучение. Для того чтобы квантовая система могла усиливать электромагнитное излучение, нужно искусственно нарушить равновесие и получить такую систему, которая имела бы на более высоком энергетическом уровне больше частиц, чем на более низком. Такие системы формально можно описывать при помощи формулы Больцмана, если считать, что T имеет отрицательное значение, поэтому они получили название систем с отрицательной температурой. В настоящее время предложено много различных методов получения состояний с отрицательной температурой в квантовых системах.

Генерация монохроматического излучения

Рассмотрим среду, атомы которой находятся в состоянии с отрицательной температурой. Если через нее пропустить электромагнитное излучение с частотой, равной частоте перехода, то благодаря процессу индуцированного испускания интенсивность проходящего через среду излучения будет увеличиваться. Однако в результате взаимодействия атомов между собой их энергетические уровни

имеют некоторую ширину, и поэтому усиление внешнего излучения благодаря индуцированным переходам возможно не только на строго определенной частоте, но и в некотором спектральном интервале. Величина этого интервала определяет ширину линии излучения при спонтанных переходах атомов. Эта ширина в различных случаях имеет различную величину. Например, для линий излучения атомов веществ, находящихся в газообразном состоянии, ширина составляет около одной миллионной от частоты перехода. Однако очень существенно то обстоятельство, что все же вероятность индуцированного излучения максимальна для частоты, совпадающей с серединой спектральной линии. Поэтому если через среду, находящуюся в состоянии с отрицательной температурой, пропустить внешнее излучение, имеющее в своем составе целый набор электромагнитных волн слегка различных частот, то максимально будет усиливаться та волна, частота которой совпадает с частотой перехода. Таким образом, выходящие из среды излучения будут более усиленными на частоте середины линии, чем на «боковых» частотах. Это означает, что у излучения, вышедшего из среды с отрицательной температурой, ширина линии будет меньше, чем у излучения, вошедшего в среду. Однако добиться полной монохроматичности излучения при помощи конечных сред с отрицательной температурой невозможно. Такой эффект можно получить лишь в том случае, когда среда бесконечна. Но практически нельзя создать среду бесконечной длины. Поэтому необходимо разработать такие устройства, которые обеспечивали бы возможность получения монохроматического излучения при помощи сред конечных размеров.

Рассмотрим, например, что произойдет с лучом света, который, последовательно отражаясь от поверхностей двух плоских параллельных друг другу зеркальных пластин, проходит через среду с отрицательной температурой (рис. 2).

Если угол падения луча на поверхность зеркал близок к прямому, то, прежде чем выйти из системы, он многократно пройдет через среду с отрицательной температурой. При этом каждый раз происходит усиление интенсивности и возрастание монохроматичности. Таким образом, применение системы параллельных зеркал эквивалентно значительному увеличению линейных размеров среды.

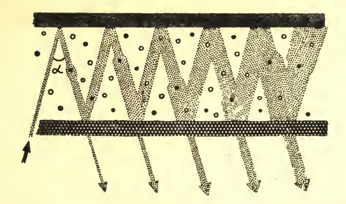


Рис. 2. Схема прохождения света через среду с отрицательной температурой, которая ограничена двумя плоскими параллельными пластинками. Нижняя пластинка имеет небольшую прозрачность. Фактически угол α очень мал

Однако более существенно то, что лучи света, распространяющиеся почти перпендикулярно к поверхности зеркал, практически не могут выйти из системы и, оставаясь, таким образом, внутри нее, продолжают непрерывно усиливаться. Именно для квантов света, распространяющихся по этим направлениям, возможно условие генерации, поскольку любой случайно попавший в систему или спонтанно излученный ею квант в данном направлении будет в дальнейшем неограниченно вызывать индуцированное излучение других, подобных себе квантов. Генерация в такой системе возникает лишь тогда, когда мощность излучения, возникающего вследствие индуцированных переходов в среде с отрицательной температурой, будет полностью компенсировать различные механизмы потерь в системе (частичное поглощение на поверхности зеркал, выход излучения в боковом направлении из-за дифракции и т. п.).

Здесь уместно остановиться на одной важной особенности генераторов, работающих в оптическом и инфракрасном диапазоне волн в сравнении с квантовыми генераторами радиодиапазона. В генераторах радиодиапазона вместо параллельных зеркал применяется резонатор, размеры которого сравнимы с длиной волны излучения.

Поэтому в таком резонаторе на частоте, равной частоте перехода, может существовать лишь один тип колебания электромагнитного поля, т. е. может возбуждаться лишь один осциллятор поля. В отличие от этого в оптическом и инфракрасном диапазоне линейные размеры «резонаторов» (т. е. системы, состоящей из двух параллельных зеркал) значительно превышают длину волны — в десятки и сотни тысяч раз. Поэтому здесь в пределах ширины линии излучения может возбуждаться огромное число различных осцилляторов поля, каждому из которых соответствует свое направление распространения и частота. Естественно предположить, что генерация в этом случае будет возникать на том типе колебаний, которому соответствуют, с одной стороны, наибольшее усиление в среде с отрицательной температурой, а с другой — наименьшие потери в резонаторе. Поэтому даже если вначале в системе существовало излучение, соответствующее нескольким различным типам колебаний, то затем в результате многократного индуцированного испускания и отражения от зеркал в системе фактически будет усилен лишь один тип колебаний. Таким образом, почти вся энергия излучения будет сосредоточена на этом типе колебаний. Поскольку каждому типу колебания соответствует определенное направление распространения и частота электромагнитной волны, то отсюда ясно, почему квантовые генераторы оптического и инфракрасного диапазона дают направленное и монохроматическое излучение. Однако практически полной монохроматичности и теоретически возможной направленности нельзя достичь. Этому мешает спонтанное излучение, неоднородность среды и несовершенство зеркал.

Генераторы оптического и инфракрасного излучений

В настоящее время осуществлены два типа генераторов, один из которых использует в качестве рабочей среды с м е с ь г а з о в, возбуждаемых низкотемпературным разрядом, другой — л ю м и н е с ц е н т н ы е к р и с т а л л ы, возбуждаемые мощным оптическим излучением.

Первый тип генератора использует для работы смесь газов гелия (давление 1 *мм рт. ст.*) и неона (0,1 *мм рт. ст.*),

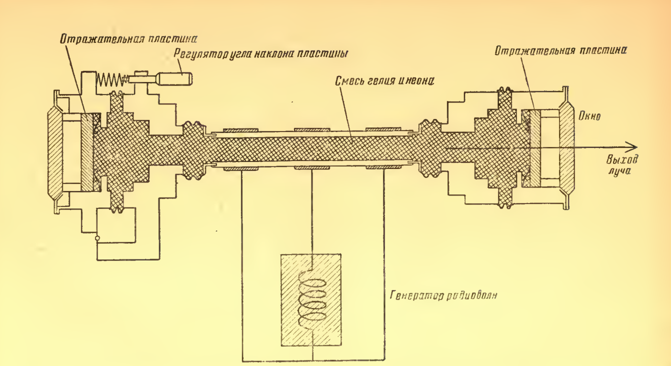


Рис. 3. Схема квантового генератора, основанного на смеси газов (неона и гелия)

заключенных в кварцевую трубку (рис. 3). Механизм возникновения отрицательной температуры в этом случае можно пояснить следующим образом.

Предположим, что взяты два газа, схема энергетических уровней которых показана на р с. 4. В электрическом разряде через смесь этих газов в результате соударений электронов с атомами газа часть последних возбуждается на более высокий энергетический уровень. Чем больше время жизни атома в возбужденном состоянии, тем большее число возбужденных атомов присутствует в газовом разряде. Однако помимо механизма электронного возбуждения атомов существует еще другой механизм передачи энергии возбуждения, а именно передача энергии при столкновении возбужденного атома одного газа с атомом другого газа, находящимся в основном состоянии. Этот процесс идет интенсивно лишь в том случае, когда какие-либо два уровня энергии атомов различных газов совпадают. Поэтому для схемы уровней, изображенных на рис. 4, эффективная передача возбуждения будет иметь место лишь для уровней *2* газа *a* и *3* газа *b*.

Рис. 4. Схема уровней двух газов
Газ *b* — «рабочий», газ *a* — вспомогательный

Если в качестве «рабочего» газа выбрать газ *b*, имеющий подходящую для создания генератора схему уровней, а в качестве вспомогательного — газ *a*, атомы которого «живут» большее время на уровне *2* и поэтому интенсивно возбуждены в газовом разряде, то в результате передачи энергии возбуждения с атомов газа *a* на атомы газа *b* число атомов *b*, возбужденных на уровень *3*, может оказаться весьма большим. При этом в газе *b* может возникнуть состояние с отрицательной температурой по отношению к уровням *3* и *2*, т. е. на уровне *3* будет больше частиц, чем на уровне *2*. На рис. 5 изображена система уровней неона и гелия. Как видно, эта схема полностью аналогична рассмотренному выше случаю. Атомы гелия, возбужденные в газовом разряде на уровень *2s*, имеют

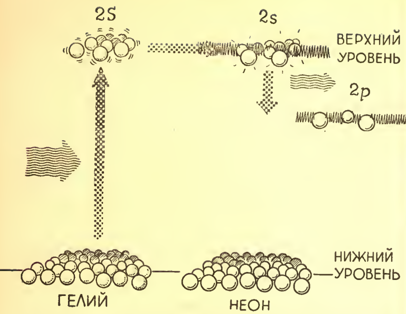


Рис. 5. Схема возбужденных энергетических уровней неона и гелия. Отрицательная температура возникает между уровнями *2s* и *2p* неона. Стрелка слева изображает возбуждение электронами, стрелка справа — излучение

большое время жизни и, следовательно, высокую концентрацию. При соударении с атомами неона атомы гелия передают им свою энергию, в результате чего в газовом разряде возникает сравнительно высокая плотность атомов неона, возбужденных на уровень *2s*. Отрицательная температура возникает по отношению к уровням *2s* и *2p* неона. Генератор, построенный фирмой «Bell system labs» (США), представлял собой кварцевую трубку длиной 80 *см* и диаметром 1,5 *см*, которая была наполнена смесью неона и гелия. Возбуждение осуществлялось высокочастотным электрическим полем, приложенным к трубке. Перпендикулярно к оси трубки устанавливались два зеркала, образующие плоский резонатор. Коэффициент отражения зеркал составлял 98,9%. Излучение, возникающее в генераторе, выводилось из системы через зеркала, имевшие коэффициент прозрачности 0,3%.

Длина волны, на которой работал генератор, составляла 1,153 μ, угол расходимости пучка света около 1′, мощность 15 *мвт*.

Во втором типе генераторов используются спектральные линии излучения различных твердых тел, главным образом монокристаллов. В твердых телах, где число активных атомов в 1 $см^3$ гораздо больше, чем в разреженных газах, можно создать высокую плотность возбужденных частиц и получить большую мощность излучения. Охлаждая тела до очень низких температур, можно существенно уменьшить уровень шумов.

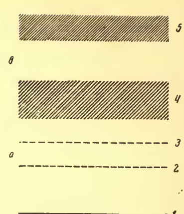


Рис. 6. Схема энергетических уровней кристалла

1 — основное состояние кристалла; 2,3 — локальные уровни примесей; 4, 5 — разрешенные зоны энергии; а, b — запрещенные зоны энергии

Материалом для первого генератора видимого света (красный цвет — длина волны 0,6943 μ) послужил монокристалл синтетического рубина. Впоследствии были созданы генераторы с использованием ряда других люминесцентных монокристаллов (ионов урана и самария во флюорите кальция).

Работу генераторов света при помощи твердых тел легко понять, если обратиться к представлению о строении энергетических уровней кристаллов. Различные опыты свидетельствуют о том, что энергетический спектр кристаллов состоит из ряда разрешенных и запрещенных полос, называемых зонами (рис. 6). Это означает, что существуют лишь определенные энергетические состояния, в которых может находиться кристалл (разрешенные уровни энергии). Внешнее возбуждение может перевести кристалл в любое из разрешенных энергетических состояний. Кроме разрешенных состояний, существуют еще и такие, в которых электрон в кристалле находиться не может. Это означает, что никакой способ возбуждения не может перевести кристалл на эти энергетические уровни. Такие состояния получили название запрещенных энергетиче-

ских зон. Если в кристаллической решетке присутствуют примеси других атомов (или ионов), то эти примеси, как правило, образуют дополнительные отдельные узкие уровни, расположенные в запрещенной зоне (см. рис. 3). Если непрерывный ряд разрешенных энергетических состояний основного кристалла позволяет электрону свободно перемещаться по всему кристаллу, то атомы примесей, образующие локальные уровни энергии, удерживают электроны вблизи себя.

Для осуществления генерации при помощи рубина, который представляет собой окись алюминия Al_2O_3 (корунд) с примесью 0,05% хрома (активатор), используются только электронные переходы между различными уровнями примеси ионов трехвалентного хрома (рис. 7). Внешним оптическим возбуждением (газоразрядная лампа, заполненная смесью неона и криптона, мощностью более 1 *Мвт*, работающая в импульсном режиме с длительностью импульса 1 *мсек*) атомы хрома из основного энергетического состояния *1* переводятся на возбужденные уров-

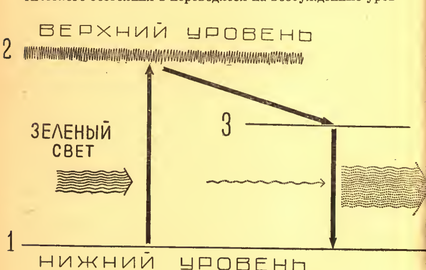


Рис. 7. Схема энергетических уровней иона хрома в корунде. Стрелками показано последовательное возбуждение, безызлучательный переход и индуцированное излучение

ни *2*, которые составляют широкую энергетическую полосу. Из возбужденной энергетической полосы атомы могут переходить обратно в основное состояние *1* с излучением света или на более низкие возбужденные энергетические уровни *3* без излучения света. Переход с уровня *3* в начальное основное состояние дает хорошо известное красное люминесцентное свечение рубина. Оказывается, что скорость перехода атомов хрома из полосы *2* на уровни *3* в 10^3 раз больше скорости перехода с уровней *3* в основное состояние.

Таким образом, если атомы хрома возбуждаются внешним источником на уровни *2* со скоростью, превышающей скорость перехода с уровней *3* на уровень *1*, то возникает избыток ионов на возбужденных уровнях *3*. Если за промежуток времени, равный времени жизни атома хрома на уровне *3*, удается перевести больше половины всех атомов хрома на этот уровень, то в кристалле возникает состояние с отрицательной температурой по отношению к переходам с уровня *3* в основное состояние *1*.

В этом случае любой квант света с частотой, соответствующей частоте перехода между уровнями *3* и *1*, будет вызывать индуцированное излучение в кристалле, в результате чего число квантов с данной частотой в системе будет увеличиваться. Таким образом, в кристалле будет происходить усиление электромагнитного излучения.

Генератор излучения, работающий на рубине, построенный фирмой «Hughes res. labs», выполнен следующим образом: кристалл рубина, тщательно приготовленный и обладающий высокой однородностью состава и оптических свойств, имел форму цилиндра высотой около 4 *см* и диаметром 0,5 *см*. Основания цилиндра были отполированы с высокой степенью точности и покрыты тонким слоем серебра, образующим поверхности зеркал плоского резонатора.

Возбуждение атомов хрома достигалось мощной газоразрядной лампой, работающей в импульсном режиме (мощность около 1 *Мвт*, длительность вспышки 1 *мсек*). Для увеличения светового потока лампа была изготовлена в виде спирали, внутри которой помещался кристалл рубина (см. рис. 1).

За время вспышки атомы хрома возбуждались на уровень *2* и затем практически мгновенно переходили на уровень *3* (см. рис. 7). Как только в системе выполнялись

условия, необходимые для возникновения генерации, в кристалле появлялось мощное световое излучение. Оно выводилось через одну из зеркальных поверхностей кристалла, которая специально для этого изготовлялась слегка прозрачной (прозрачность около 1%).

Генератор работал на длине волны 6943 Å (красный свет). Излучение генератора обладало высокой степенью монохроматичности; частотный состав излучения уменьшался более чем в 30 раз по сравнению с частотным составом излучения из рубина в случае обычной люминесценции.

Помимо высокой монохроматичности, генератор дает резко направленный пучок лучей. В описываемом приборе расходимость пучка составляла около 0,3—1°.

Была осуществлена также генерация в кристалле флюорита кальция с примесью ионов урана и самария. В первом случае генерация осуществлялась в инфракрасной области на длине волны 24 900 Å, во втором — на границе инфракрасного и оптического диапазона волн, на длине волны 7080 Å.

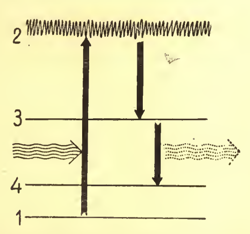


Рис. 8. Принципиальная схема энергетических уровней урана или самария в флюорите кальция. Стрелками показано последовательное возбуждение с уровня *1* на уровень *2*, безызлучательный переход *2* → *3*, индуцированное излучение происходит с уровня *3* на уровень *4*

Принципиально эти генераторы устроены аналогично рубиновому генератору, однако использование весьма удобной схемы уровней этих ионов позволило существенно снизить мощность возбуждающего света. В рубине отрицательная температура создается между возбужденным и основным уровнем, что требовало возбуждения более половины всех ионов примеси, в случае же урана и самария — между двумя возбужденными уровнями *3* и *4* (рис. 8). Если кристалл поддерживать при низкой температуре (в этих экспериментах был использован жидкий гелий при температуре около 4°K), то число ионов, возбужденных вследствие теплового движения на нижний из рассматриваемых уровней, будет очень мало, и поэтому достаточно весьма небольшого возбуждения внешним источником для того, чтобы возникло состояние с отрицательной температурой.

Кроме люминесцентных кристаллов, существуют также возможности использования других материалов для создания генераторов оптического и инфракрасного излучений, в частности полупроводников. Применение полупроводников могло бы дать весьма ценные результаты, например осуществление электрических способов возбуждения, получение высоких плотностей возбужденных центров, возможность изменения частоты генерации в магнитном поле и т. д.

Возможное применение оптических генераторов

Итак, в отличие от люминесцентных и тепловых источников важнейшая особенность генераторов оптического диапазона волн заключается в том, что они дают высокомонохроматические излучения. Причина этого лежит в том, что излучение отдельных атомов среды с отрицательной температурой когерентно, т. е. имеет одинаковую фазу. Более того, генераторы позволяют получать «чистые типы» волн (т. е. либо плоскую, либо сферическую), а это означает, что с их помощью может быть создан точечный источник большой яркости или, иначе, что все излучение, даваемое генератором, может быть сфокусировано в «точку» с размерами порядка длины волны.

При фокусировке когерентного излучения в малых объемах создается очень высокая концентрация энергии. При этом могут наблюдаться чрезвычайно интересные

явления. Еще в конце XIX в. П. Н. Лебедевым было открыто давление света. Оно настолько мало, что совершенно неощутимо в нашей обычной жизни и может быть замечено лишь при помощи чувствительных приборов. Но при концентрациях энергии света, о которых мы говорили выше, это давление может достичь фантастических значений — миллиона атмосфер. Осуществление такого давления открывает возможность целого ряда научных и технических применений (исследование свойств веществ в сильных электрических полях, ускорение заряженных частиц, ускорение химических реакций, точная обработка различных материалов).

Получение полей огромной напряженности позволяет подойти к вопросу о проверке некоторых выводов квантовой электродинамики — о возможности взаимодействия световых квантов между собой, в частности, рассеяние одного кванта другим, подобно тому, как в ядерной физике исследуется рассеяние одних элементарных частиц на других. С создания оптических генераторов началось «радиотехническое» освоение нового широкого диапазона волн. Стремление радиотехники применять наиболее короткие волны связано с тем, что повышение частоты радиоизлучения позволяет, с одной стороны, увеличить объем передаваемой информации, а с другой — повысить дальность радиопередачи благодаря уменьшению расходимости пучка радиоволн и использованию направленности радиосвязи.

Переход к оптическому диапазону, где частота излучения исчисляется сотнями миллионов и даже миллиардами мегагерц, дает возможность передавать огромные объемы информации. Например, на генераторе, работающем на смеси газов гелия и неона, в принципе можно было бы осуществить передачу десяти тысяч телевизионных программ.

Минимальная расходимость пучка радиоволн при использовании направленной радиосвязи ограничена дифракцией. Угол расходимости пучка радиоволн (угол дифракции) пропорционален длине волны и обратно пропорционален размеру передающей антенны. Например, чтобы «осветить» на Луне с Земли площадку в 1 *км*^{2} в оптическом диапазоне волн, понадобится прожектор диаметром всего в 20—30 *см*, в то время как в сантиметровом диапазоне потребуется антенна диаметром более одного

километра. Поэтому при заданном размере антенны для передачи сигнала на далекое расстояние необходимая мощность генератора уменьшается с увеличением частоты излучения. Расчеты показывают, что при помощи уже существующих в настоящее время генераторов и приемников излучения в оптическом диапазоне возможно осуществить связь на гигантское расстояние в несколько световых лет.

Высокая монохроматичность излучения, даваемая генератором, означает, что это излучение имеет строго определенную длину волны, исчисляемую для указанного выше генератора с относительной точностью в несколько сот миллиардных. Поэтому такие генераторы могут быть использованы для разработки стандартов длин высокой точности.

Одновременное измерение длины волны и частоты квантовых генераторов позволяет точно измерить скорость света.

При помощи таких генераторов можно решить много важных проблем из области физики твердого тела, спектроскопии, биологии, медицины и т. д.

Началось использование квантовых генераторов в различных областях техники (радиолокация, ночное ви́дение, вычислительные машины и др.).

* * *

В настоящее время техника генерации инфракрасного и оптического излучений развивается бурными темпами. И хотя уже построены первые приборы, все же их создание следует рассматривать только как первые шаги в этом направлении. Дальнейшее освоение инфракрасного и оптического диапазона волн потребует решения целого комплекса сложных задач.

Сейчас трудно сказать, сколько пройдет времени, пока будут созданы совершенные приборы в инфракрасном оптическом диапазоне волн. Однако очевидно, что работа в этой области становится одной из центральных проблем науки.

Оптические квантовые генераторы на полупроводниках*

Кандидат физико-математических наук
О. Н. Крохин

Конец 1962 г. принес новый большой успех квантовой радиофизике: созданы первые оптические полупроводниковые генераторы. Это произошло спустя два с половиной года после осуществления оптического генератора когерентного света на кристалле рубина. Идея использования полупроводников для квантовых генераторов оптического диапазона родилась еще в 1958 г. Столь длительный срок, понадобившийся для ее осуществления, весьма красноречиво свидетельствует о трудностях, которые пришлось преодолеть. А трудности были столь велики, что зачастую возникало скептическое отношение к проблеме полупроводниковых генераторов, особенно заметно проявившееся на Второй международной конференции по квантовой электронике, проходившей весной 1961 г. Однако, как это часто бывает, трудности полностью окупаются многими ценными свойствами, которыми обладают полупроводники. В первую очередь, это возможность возбуждения полупроводников электрическим током, весьма значительный коэффициент полезного действия, связанный с прямым преобразованием электрического тока в свет, большие вероятности излучательных переходов и, следовательно, возможность получения высоких коэффициентов усиления. Полупроводники позволяют менять частоту излучения при помощи магнитного поля, а использование в качестве активных частиц подвижных носителей тока позволяет надеяться на высокую стабиль-

* «Природа», 1963, № 5.

ность полупроводникового генератора подобно газовым системам. С другой стороны, модулируя ток возбуждения, представляется возможность прямой модуляции излучаемого света.

Применение полупроводников для квантовых генераторов оптического диапазона было предложено в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР в 1958 г. С тех пор было рассмотрено несколько различных способов использования полупроводников, в частности и вариант, осуществленный экспериментально в ФИАНе (СССР), в исследовательской лаборатории Американской фирмы «Дженерал электрик» и других лабораториях США и Европы.

Как хорошо известно, для осуществления квантовых генераторов необходимо создать особые термодинамические неравновесные состояния вещества. Это должны быть такие состояния, что если ограничиться двумя какими-либо возможными энергетическими уровнями, то в состоянии с большой энергией должно находиться большее число частиц. В этом случае вещество способно усиливать проходящее через него электромагнитное излучение.

В полупроводнике состоянию с большей энергией (верхний энергетический уровень) соответствует присутствие в нем частиц, способных проводить ток, называемых носителями тока. В состоянии с меньшей энергией (нижний энергетический уровень) носители тока отсутствуют. Важная особенность полупроводника в том, что в нем существует два вида носителей тока: с отрицательным зарядом —электроны и положительным —дырки. Эти электроны и дырки могут попарно исчезать — рекомбинировать, освобождая при этом заключенную в них энергию, излучая, например, электромагнитную волну. В чистом полупроводнике число электронов и дырок одинаково; оно определяется температурой: чем выше температура, тем больше носителей тока. Однако нагреванием невозможно получить необходимые для квантовых генераторов состояния полупроводника. Из законов термодинамики вытекает, что на верхнем энергетическом уровне не может быть больше частиц, чем на нижнем. Поэтому необходимы специальные методы создания высоких, так называемых неравновесных концентраций электронов и дырок.

Так, например, введением в полупроводник специальных примесей можно получить в нем даже при низких

температурах высокие концентрации носителей тока, причем один тип примесей создает электроны, а другой — дырки. В одну и ту же часть кристалла бесполезно вводить одновременно оба типа примесей: все «лишние» электроны и дырки будут мгновенно рекомбинировать, и общее их количество будет опять определяться температурой, при которой находится полупроводник. Но можно идти и другим путем, а именно: вводить различные примеси в разные места полупроводникового кристалла. Тогда в одной части кристалла будет много электронов, в другой — много дырок. Затем приложением электрического поля можно заставить электроны и дырки двигаться навстречу друг другу так, что в очень небольшой части кристалла возникает высокая концентрация одновременно и электронов и дырок, которые, рекомбинируя друг с другом, способны усиливать электромагнитную волну, проходящую через эти части кристалла. На место исчезнувших носителей тока из внешнего источника приходят другие, и в цепи непрерывно течет ток, а вся система способна усиливать электромагнитное излучение.

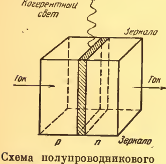


Схема полупроводникового генератора

Для того чтобы полупроводник работал в качестве генератора, его следует поместить между двумя параллельными полуотражающими зеркалами, которые часть испущенного полупроводником излучения возвращают снова в кристалл, где оно снова усиливается, и т. д. Практически, однако, нет необходимости делать специальные зеркала: вследствие большого коэффициента отражения полупроводников роль зеркал выполняют тщательно отполированные грани самого кристалла.

В недавно созданном полупроводниковом генераторе используется описанный выше принцип. Генератор представляет собой монокристалл арсенида галлия, по форме близкий к кубу, с размерами кристалла всего лишь около $^1/_2$ *мм*. Две противолежащие грани кристалла отполированы; они перпендикулярны плоскости, которая разделяет полупроводник на две части: по одну сторону ее на-

ходятся электроны, по другую — дырки. Активная область, т. е. область, где происходит усиление волны, расположена вдоль плоскости толщиной всего лишь в несколько микрон. Вдоль нее распространяется излучение, т. е. перпендикулярно зеркальным плоскостям и, благодаря частичному пропусканию, выходит из кристалла. Генератор излучает на длине волны 8430 Å, лежащей в области инфракрасных лучей, близких к видимым, с шириной линии около 0,1 Å. Работа ведется при температуре жидкого азота (—196° С), сила тока составляет около 30 *а*, а плотность тока $\sim 10^4$ *а/см*^{2}.

Описанный метод далеко не исчерпывает всех возможностей создания квантового генератора на полупроводниках. Нет сомнения, что за первым успехом, доказавшим принципиальную осуществимость полупроводникового генератора, последуют другие работы, которые внесут много нового в квантовую электронику оптического диапазона.

Физика пространства и времени*

Доктор физико-математических наук
Д. А. Франк-Каменецкий

«Абсолютное» и физическое пространство

Старая классическая физика не решалась направить оружие научного исследования на раскрытие свойств пространства и времени. Эти свойства считались наперед заданными, выводимыми из простейших аксиом и подведомственными не физике, а математике. Основатель классической физики Исаак Ньютон так и писал об «абсолютном, истинном, математическом» пространстве и о таком же времени. Великая революция, совершившаяся в начале XX в. в физике и связанная с именем Альберта Эйнштейна, привела к тому, что пространство и время перестали быть «априорными формами» и сами стали объектом физического исследования. Для неискушенного ума картина мира стала сложней: это остроумно выражено в эпиграмме:

Был этот мир глубокой тьмой окутан.
Да будет свет! — И вот явился Ньютон.
Но сатана недолго ждал реванша.
Пришел Эйнштейн,— и стало все как раньше...

На самом деле картина мира в современной физике имеет свою внутреннюю стройность и, если привыкнуть к ней, то даже и простоту.

Основная идея Эйнштейна состоит в том, что свойства пространства и времени должны не задаваться наперед,

* «Природа», 1961, № 1.

но выводиться из опыта и наблюдения. Эти свойства не обязательно должны быть всюду и везде одинаковыми; они могут меняться от точки к точке и от момента к моменту. Нам трудно себе представить трехмерное пространство иным, чем мы привыкли. Чтобы понять, как могут меняться свойства пространства, полезно прибегнуть к аналогии с меньшим числом измерений.

Пространство искривляется

Представим себе плоское существо (условно будем называть его «жуком»), живущее на плоском листе бумаги (рис. 1). Если жук не может выйти с поверхности листа, то он живет в плоском двухмерном пространстве. Оно аналогично трехмерному пространству Эвклида — единственному, какое знала классическая физика.

Но лист бумаги вовсе не обязательно должен быть плоским, даже если вне его и ничего нет. Представим себе для ясности, что лист вместо бумажного стал резиновым. Такой гибкий лист может искривляться и растягиваться. Привычнее полагать, что двухмерный лист изгибается в трехмерном пространстве, но можно представить себе и кривой лист, вне которого ничего нет. Бросим на плоский лист резины стальной шарик. Вблизи шарика лист прогнется. Двухмерный жук, ползающий по листу, этого даже не заметит. Но если вслед за первым мы бросим на лист второй шарик, он скатится в углубление к первому (рис.2). «Жуку» покажется, что шарики притягиваются один к другому. Это — довольно наглядная аналогия теории тяготения Эйнштейна. Согласно этой теории, вблизи вся-

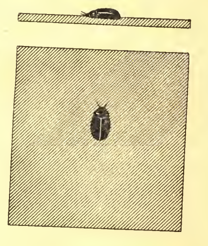
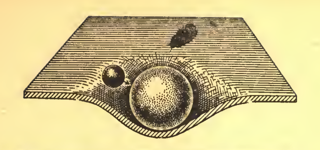


Рис. 1. Плоский «жук» в плоском двухмерном пространстве. «Жук» не может выйти за пределы плоскости чертежа; с его точки зрения вне этой поверхности ничего нет



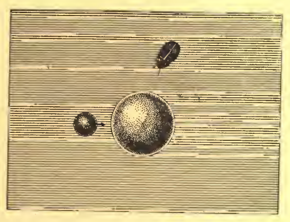


Рис. 2. Искривление пространства вблизи тяготеющих масс. Большой шар «продавил» в гибком листе впадину. Маленький шарик скатывается в эту впадину. «Жук» не видит впадины, так как для него вне поверхности ничего нет. «Жук» «думает», что большой шар притягивает к себе маленький

кой массы пространство искривляется. В искривленном пространстве кратчайшее расстояние между двумя точками — не прямая линия, а кривая, которую называют г е о д е з и ч е с к о й. В плоском пространстве закон инерции требовал, чтобы свободное движение было прямолинейным. В кривом пространстве тот же закон будет звучать так: свободное движение происходит по геодезической.

Время сочетается с пространством

Сила тяготения заставляет тела двигаться по кривым линиям: снаряд по параболе, планеты по эллипсам. Если представить это криволинейное движение как свободное движение в искривленном пространстве, то не нужно никакой силы тяготения, действующей на расстоянии. Достаточно считать, что всякая масса локально (т. е. вблизи себя) искривляет пространство, и это искривление передается, подобно волне, из точки в точку. При этом сразу объясняется одна из величайших загадок физики — равенство инертной и тяготеющей масс. Но чтобы объяснить тяготение, недостаточно искривить обычное трехмерное пространство. Ведь сила тяжести может сделать движение не только криволинейным, но и ускоренным. Чтобы объяснить тяготение изменением свойств пространства, надо сделать ускоренное движение частным случаем криволинейного. Для этого надо превратить время в одно из измерений пространства.

К счастью, основа для эйнштейновской теории тяготения была уже подготовлена теорией относительности. Опыт Майкельсона показал, что скорость света не меняется при переходе от «неподвижной» системы отсчета к движущейся. Отсюда Эйнштейн вывел свою теорию относительности. По интересной идее Минковского эту теорию можно истолковать как слияние обычного пространства и времени в единое четырехмерное сверхпространство (или пространство-время). Этот «гибрид» пространства и времени замечателен тем, что три измерения пространства выражаются в нем действительными числами, а время — мнимым числом, да притом умноженным на скорость света. В силу такого растяжения оси времени эффекты, связанные с теорией относительности (релятивистские эффекты), заметны лишь при скоростях, сравнимых со скоростью света (рис. 3). Изменение системы отсчета может быть представлено как вращение ее в четырехмерном пространстве. Скорость света при этом не меняется. Обычная длина меняется (релятивистское сокращение), меняется и время (поэтому из полета с почти световой скоростью космонавт вернется молодым, по сравнению со своими ровесниками). Но сохраняется так называемый интервал, т. е. четырехмерное расстояние между двумя событиями.

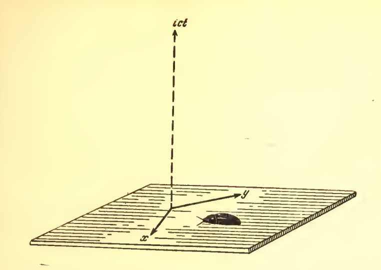


Рис. 3. Сочетание двухмерного пространства со временем. «Жук» не видит ничего вне плоскости. С точки зрения теории, временную ось можно направить перпендикулярно плоскости. Но эта ось мнимая

Искривление четырехмерного пространства-времени позволило Эйнштейну полностью объяснить все явления тяготения. Науку о движении тел в плоском пространстве-времени назвали специальной, а в искривленном — общей теорией относительности. Но, как справедливо замечает В. А. Фок, последнюю правильнее было бы назвать теорией тяготения. Замечательно в этой теории то, что тяготение проявляется как воздействие тел на свойства пространства-времени. Еще замечательнее то, что тела меняют структуру окружающего их пространства-времени, искривляют его. Это уже не абсолютное математическое, а конкретное физическое пространство. Геометрия его уже неэвклидова; в зависимости от плотности вещества она может быть приближенно эвклидовой, или приближенно геометрией Лобачевского, или приближенно геометрией Римана. Это пространство обладает вполне определенными физическими свойствами, которые выражаются сложной математической величиной — фундаментальным метрическим тензором.

Идея искривленного пространства дала основу для интересных, хотя отнюдь и не бесспорных домыслов о геометрических свойствах вселенной в больших масштабах. До сих пор эти вопросы рассмотрены теоретически только в простейшем предположении, что плотность вещества во всем пространстве равномерна. По ньютоновой механике, в бесконечном пространстве, равномерно заполненном веществом, возник бы везде бесконечный потенциал тяготения, что бессмысленно. Теория тяготения Эйнштейна допускает без всяких затруднений равномерное заполнение веществом неограниченного пространства. Для кривого пространства понятия «бесконечный» и «безграничный» не совпадают. Чтобы понять это, вернемся к аналогии с двухмерным пространством. Если резиновый лист, о котором мы говорили, должен изгибаться одинаково в каждой точке, это может повести к тому, что он свернется в шар (рис. 4). Поверхность шара замкнута: она не имеет границ, но конечна по величине. Она везде одинаково выпукла, или,

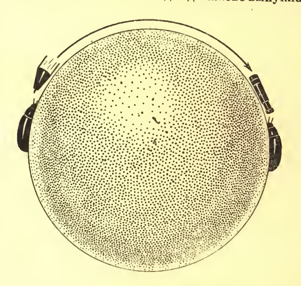


Рис. 4. Пространство свернулось в шар. Закрытая модель пространства. Она безгранична, по конечна. Прямых линий нет. Лучи света тоже распространяются по геодезическим

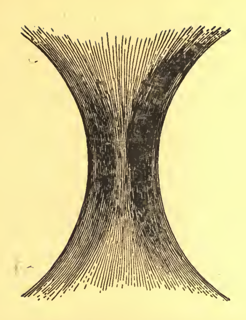


Рис. 5. Открытая модель пространства. Пространство во всех точках седлообразно. Оно не только безгранично, но и бесконечно. Чертеж надо представлять себе простирающимся до бесконечности

как говорят, имеет постоянную положительную кривизну. Можно построить геометрию замкнутого трехмерного пространства с постоянной положительной кривизной, подобной поверхности шара. Это — геометрия Римана. Такое пространство безгранично, но конечно. Однако возможна совершенно равноправная геометрия, где пространство везде седлообразно или, как говорят, имеет постоянную отрицательную кривизну (рис. 5). Это геометрия Лобачевского. Двухмерной аналогией такого пространства будет везде седлообразная поверхность (псевдосфера). Пространство Лобачевского не только безгранично, но и бесконечно. В 1922 г. советский ученый А. А. Фридман показал, что теория тяготения Эйнштейна позволяет построить две совершенно равноправные модели безграничной вселенной, равномерно



Рис. 6. Расширение двухмерного пространства. Закрытая модель пространства расширяется со временем. Каждому «жуку» кажется, что все остальные «разбегаются» от него

заполненной веществом. Это — закрытая модель, подобная поверхности шара, и открытая, отвечающая геометрии Лобачевского. Какая из них осуществляется — зависит от плотности вещества. Если плотность больше, чем 10 ядерных частиц (протонов) в кубометре, то пространство должно замкнуться в сверхшар (гиперсферу). При плотности меньше 10 частиц в кубометре справедлива открытая модель.

Интересно, что попытки оценить среднюю плотность вещества в доступной нашему наблюдению вселенной дают величину, близкую к граничной величине (10 частиц в кубометре). Если считать, что такова же средняя плотность во всей вселенной, то по имеющимся данным нельзя решить, замкнутая наша вселенная или открытая. Однако лежащее в основе всей этой теории допущение равномерной плотности ни на чем, кроме простоты расчета, не основано, так что истинная геометрия вселенной может быть гораздо сложнее.

Замечательное свойство обеих моделей Фридмана заключается в том, что все расстояния между телами должны в них меняться со временем. Пространство должно либо расширяться, либо сжиматься. Наглядно это проще представить для закрытой модели (рис. 6). Ее двухмерная аналогия — резиновый шар или мыльный пузырь, который может раздуваться или сжиматься. Пусть на шаре сидят несколько «жуков». Когда шар раздувается, каждому из них покажется, что все остальные «разбегаются» от него. Это — аналогия «разбегания» галактик, которое обнаружили астрофизики по красному смещению спектральных линий.

Отметим, что поверхность шара не имеет центра. Каждый «жук» с одинаковым правом может утверждать, что именно он находится в центре мироздания и что все остальные «разбегаются» от него.

Следует ли из теории искривленного пространства конечность мира? Отнюдь нет. Закрытая модель — только одна из двух моделей с равномерной плотностью. Если же отказаться от произвольного допущения равномерной плотности, то возникают бесчисленные возможности, совершенно еще не исследованные.

Резервуар электромагнитных волн

Мы познакомились с одним физическим свойством пространства-времени: способностью искривляться и передавать таким образом поле тяготения. Единственное ли это физическое свойство реального пространства? Оказывается — отнюдь нет. Не менее важное значение, чем сила тяготения, имеют в физике электромагнитные силы. Величайшим триумфом классической физики была теория Максвелла, показавшая, что свет и подобные ему излучения можно рассматривать как электромагнитные волны. Фарадей и Максвелл ввели в физику понятие поля и показали, что электромагнитные взаимодействия и излучение можно рассматривать как свойства поля. Возник вопрос: может ли существовать пространство, свободное от поля? Классической физике казалось, что может. Она отрывала «абсолютные математические» свойства пространства от физических свойств поля. В квантовой физике положение кардинально изменилось.

Исходным пунктом нового развития можно считать знаменитую формулу Рэлея—Джинса, одну из самых замечательных формул классической физики, давшую первый «сигнал бедствия» о недостаточности этой науки. Рэлей и Джинс подсчитали число степеней свободы излучения, которое может поместиться в данном объеме пространства. Если считать объем ограниченным, то это обычная задача о резонаторе. Всякий резонатор имеет много резонансных, или *собственных*, частот. В объемном резонаторе на каждой собственной частоте возможно много различных типов колебаний, отличающихся по форме. Каждая степень свободы излучения представляет определенный тип электромагнитных колебаний, которые могут возбуждаться в большей или меньшей степени.

Можно представить дело так, что в каждом данном объеме пространства находится определенное число *осцилляторов*, т. е. систем, способных совершать колебания. Каждую степень свободы излучения, т. е. каждый тип электромагнитных колебаний, часто называют осциллятором поля. Резонатор конечного объема содержит для каждой данной частицы определенное *число* осцилляторов поля. Для неограниченного пространства можно найти *плотность* осцилляторов на единицу объема. Эта плотность и дается формулой Рэлея—Джинса.

Таким образом, у пространства обнаружилось новое свойство: оно оказалось резервуаром электромагнитных волн. Правда, вначале казалось, что эти волны должны обязательно испускаться какими-либо телами. Являются ли они непременным свойством самого пространства? Дальнейшее развитие науки показало, что это именно так.

Нулевые колебания вакуума

Если пространство длительно соприкасается с какими-либо телами, то оно должно прийти с ними в тепловое равновесие. При этом каждый осциллятор поля приобретает определенную энергию. Еще Планк установил, что эта энергия может передаваться только квантами. Но когда была построена последовательная квантовая теория, из нее получился поразительный результат. Оказалось, что кроме целого числа квантов, которые можно добавлять или отбирать, у осциллятора есть еще всегда «лишняя» половина кванта энергии, которую от него отобрать невозможно. Это так называемая нулевая энергия. Даже при абсолютном нуле температуры, когда вся доступная энергия отнята, осцилляторы поля продолжают совершать нулевые колебания.

Электромагнитные колебания оказываются неотъемлемым свойством «пустого» пространства. Эта пустота, наделенная определенными физическими свойствами, есть так называемый физический вакуум. Неотъемлемым свойством его являются нулевые колебания.

Пространство полно нерожденными квантами

Заполнение пустоты стало еще более наглядным, когда выяснилось, что электромагнитную волну можно описывать как поток частиц — фотонов, каждый из которых несет квант энергии. Иначе их называют просто квантами излучения. С точки зрения современной физики, фотоны вполне равноправны с частицами вещества. Ведь по квантовой механике любые частицы имеют волновую природу. Пространство, в котором есть излучение, мы никак не можем считать пустым: в нем находятся фотоны. Но еще более важным свойством пространства, чем наличие реальных фотонов, является существование осцилляторов поля (рис. 7). Ведь именно осцилляторы — носители квантов. Каждый осциллятор может быть «загружен» любым целым

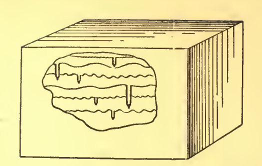


Рис. 7. Пространство заполнено осцилляторами поля. Каждый осциллятор есть система, способная совершать колебания. Для наглядности мы изобразили их в виде камертонов. Число осцилляторов подсчитывается для ограниченного объема «ящика». Затем можно устремить этот объем к бесконечности

числом квантов. Но если осцилляторы свободны от квантов, все равно плотность их остается важнейшей характеристикой пространства.

В классической физике считалось, что излучение испускается частицами вещества в пустое пространство. Вещество играло активную роль; пространство — пассивную. В квантовой физике испускание излучения рассматривается как результат взаимодействия частицы вещества с осцилляторами поля, т. е. с «пустым» пространством.

Если бы была справедлива классическая физика, атом с электронами, движущимися вокруг ядра, вообще не мог бы существовать стационарно. Согласно классической электродинамике, движущийся электрон должен был непрерывно излучать электромагнитные волны. Квантовая механика объяснила существование стационарных состояний электрона. Но чтобы объяснить испускание излучения возбужденным атомом, нужно ввести внешнее воздействие. Такое воздействие в квантовой теории излучения исходит от осцилляторов поля. Испускание может происходить под действием фотонов, если они есть в окружающей среде. Это так называемое вынужденное (индуцированное, или стимулированное) испускание, на котором основана современная квантовая радиофизика. Но и в пустом пространстве, свободном от фотонов, возбуж-

денный атом также излучает. Это **спонтанное** испускание (то, что мы обычно наблюдаем у светящегося тела) происходит от взаимодействия уже не с фотонами, а со свободными осцилляторами поля, т. е. нулевыми колебаниями вакуума. Замечательно, что в формулы квантовой теории излучения плотность фотонов и плотность осцилляторов входят совершенно одинаковым образом. Таким образом, свободные осцилляторы можно рассматривать как «резервный фонд» еще не родившихся, но возможных, или, как говорят, **виртуальных**, фотонов — квантов излучения.

Электромагнитные волны — только одно из проявлений электромагнитного поля. Другими проявлениями того же поля будут все электромагнитные взаимодействия, например притяжения и отталкивание зарядов по закону Кулона. Все эти явления, согласно квантовой теории поля, происходят через посредство фотонов. Поэтому и говорят, что фотоны — это полевые частицы, кванты электромагнитного поля.

Поля и частицы

Но электромагнитные взаимодействия — не единственные. Ядерная физика обнаружила очень мощные ядерные силы. Их так и называют «сильным взаимодействием». Это взаимодействие тоже удалось проквантовать, т. е. объяснить через посредство полевых частиц — π-мезонов. Всякому квантовому полю соответствует определенный вид полевых частиц. И наоборот, всякому виду элементарных частиц отвечает квантовое поле взаимодействия. Так же, как в случае фотонов, квантовая теория приходит к выводу, что и в пустом пространстве, где нет реальных частиц, присутствуют виртуальные частицы, т. е. осцилляторы поля, совершающие нулевые колебания. Наличие этих осцилляторов — неотъемлемое свойство пространства, а число различных видов осцилляторов такое же, как число различных видов частиц.

Фотон — простейшая из частиц в том смысле, что он является своей собственной античастицей. Как правило, процессу испускания отвечает «рождение» не одной частицы, а пары: частица—античастица.

Таким образом, возникает весьма сложная и величественная картина свойств пространства. Реальное пространство — физический вакуум — представляет собой сово-

купность всех физических полей и неисчерпаемый резервуар частиц и античастиц всевозможных родов.

Чтобы не усложнять изложение, мы говорили «пространство». Но в точной формулировке квантовая теория поля, как и всякая физическая теория, должна быть релятивистской, т. е. удовлетворять требованиям теории относительности. Поэтому физический вакуум — это не просто пространство, а четырехмерное пространство-время.

Геометрия и физика

Так физике удалось избавиться от «действия на расстоянии» и представить все взаимодействия не как свойства тел, а как свойства самого физического пространства (физического вакуума или поля). Но при этом возникла некоторая двойственность: тяготение объясняется геометрическими свойствами пространства, а электромагнитные и все остальные поля — своеобразными квантовыми, т. е. чисто физическими его свойствами. Многие рассматривают эту двойственность как недостаток современной физики и ищут путей к его преодолению. Можно мыслить два противоположных пути: либо квантование поля тяготения, либо геометризацию всех полей. Но ни на одном из них не удалось достичь решающих успехов.

Немного фантазии

До сих пор мы говорили только о хорошо разработанных теориях, подтвержденных достоверными фактами. Геометрическая теория тяготения подтверждается многолетними наблюдениями над движением Меркурия, квантовая теория поля — тонкими измерениями смещения линий в спектре водорода. В каком направлении должна развиваться дальше наука о пространстве и времени? На этот вопрос каждый может отвечать по-своему. Можно требовать, чтобы теория была единой, и стремиться к геометризации всех полей. Можно требовать, чтобы вся теория была квантовой и квантовать поле тяготения. Можно требовать, чтобы пространство было несимметричным и различало правое от левого. Ни для того, ни для другого, ни для третьего нет пока веских оснований.

Позволим себе в заключение немного пофантазировать о том, чего бы мы хотели ждать от дальнейшего развития науки.

Нет ничего плохого в том, что поле тяготения связано с геометрическими свойствами пространства, а все остальные поля — с квантовыми свойствами физического вакуума. Но надо научиться рассчитывать явления, в которых одновременно сказываются как геометрия, так и физика пространства. Приведем пример. Уже давно Л. Д. Ландау и С. Чандрасекар показали, что небесное тело, лишенное внутренних источников энергии, при массе больше определенного предела должно неограниченно сжиматься. Чем же это сжатие кончится? Сейчас трудно ответить на этот вопрос, так как здесь должны одновременно возрасти до невообразимых пределов как сила тяжести, так и ядерные силы.

С этим вопросом тесно связан другой: будет ли при учете тяготения и ядерных сил физический вакуум абсолютно устойчивым? Ведь вакуум, т. е. пустое пространство, — неисчерпаемый резервуар частиц и античастиц. Чтобы эти античастицы перешли из виртуального состояния в реальное, нужна энергия. Но если образуется сразу очень большая «куча» нейтронов и антинейтронов, то выигрыш в энергии тяготения и энергии ядерных сил может перевесить расход энергии на «рождение» частиц. Вероятность «рождения» такой кучи из вакуума может оказаться хоть и весьма малой, но не равной нулю.

Представим себе вселенную как бесконечное пространство, в основном плоское и свободное от вещества. Очень редко где-либо происходит грандиозная «флюктуация» (случайное возмущение) вакуума — образование колоссальной массы из нейтронов и антинейтронов. Эта масса вызывает местное искривление пространства, приводящее к его местному расширению. В ходе расширения частицы и античастицы соединяются между собой с испусканием излучения. Возникают турбулентные движения невообразимо больших масштабов, и там, где случайно возник избыток нейтронов, возникает «мир» (т. е. большое собрание галактик), подобный нашему, а при избытке античастиц — «антимир».

Пока то, о чем мы сейчас говорили, относится к области фантазии, а не науки. Но эта фантазия наглядно показывает, сколь интересны явления, в которых одновременно важны как тяготение, так и ядерные силы. Дальнейшее развитие теоретической физики должно привести к более полному пониманию подобных явлений и, следовательно, к решению многих загадок пространства и времени.

Тяготение, пространство, время*

Доктор физико-математических наук
А. С. Компанеец

Тысячелетиями человек стремился познать движение небесных тел. Огромный материал, накопленный наблюдательной астрономией, позволил Кеплеру сформулировать свои знаменитые три закона движения планет вокруг Солнца. Законы Кеплера нашли «объяснение» в механике Ньютона в том смысле, что закономерности движения планет были выведены из неизмеримо более общих законов ньютоновой механики. Здесь был достигнут первый решающий успех физической теории; в течение столетий механику Ньютона рассматривали как единственно возможный образец точного знания.

При этом часто забывали, что в конечном счете основой механики является изучение мира на опыте. Казалось невероятным, что может существовать движение материи, подчиненное иным, не ньютоновым закономерностям.

Некоторые основные положения механики Ньютона

Сформулируем основные положения ньютоновой механики не совсем так, как они излагаются в школьных учебниках, но так, чтобы легче было объяснить смысл тех огромных обобщений, которые произвела теория относительности.

Всякое механическое движение тела относительно: его можно определить только по отношению к какому-то

* «Природа», 1961, № 5.

другому телу, например задавая движение поезда относительно земли, планеты относительно Солнца и т. д. Положение тела в пространстве задается при помощи координатной системы. Если связать оси координат с тем телом, по отношению к которому задается движение, получится *система отсчета*. Движение всегда определяется в какой-либо системе отсчета.

Выбор системы отсчета обычно связан с рассматриваемой задачей механики: если изучается стрельба из неподвижного орудия, оси системы отсчета удобно полагать скрепленными с землей, при стрельбе с идущего корабля лучше связать их с самим кораблем.

В слове «лучше» есть элемент произвола. Но существуют системы отсчета, в некотором смысле выделенные среди остальных: относительно этих систем *все* ускорения тел обязаны только *взаимодействиям* между телами. Такие системы называют *инерциальными*. Тело, которое ни с чем не взаимодействует, движется относительно инерциальной системы прямолинейно и равномерно, «по инерции».

В понятии инерциальной системы заключена идеализация, потому что совершенно инерциальных систем не существует. Но есть системы более и менее инерциальные. Возьмем, например, такие две системы отсчета: одна скреплена с железнодорожным перроном, т. е. с землей, а другая с поездом. В момент остановки поезда пассажиры испытывают толчок в сторону передней стенки вагона. Этот толчок (ускорение), очевидно, обязан не взаимодействию пассажиров со стенкой, а характеру движения поезда. На перроне никто толчка не испытывает. Система отсчета, связанная с перроном, ближе к инерциальной, чем связанная с поездом. Но можно заметить и отклонения от инерциальности в системе, связанной с землей: камень, падающий с большой высоты, отклоняется из-за вращения Земли от направления отвеса к востоку (рис. 1).

В данном случае отвес показывает, как направлено взаимодействие камня с землей. Это взаимодействие называется в механике *силой тяжести*. Падающий камень отклоняется от направления силы тяжести из-за неинерциального характера движения Земли: ее вращения вокруг оси. В механике любое взаимодействие между телами описывается в терминах силы, причем не обязательно только силы тяжести.

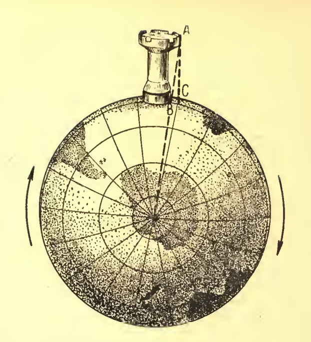
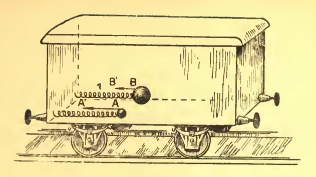


Рис. 1. Земля изображена со стороны южного полюса. Прямая AB указывает направление отвеса и силы тяжести. Падающий камень обгоняет точку B и падает на Землю в точке C. Отклонение от направления отвеса вызвано неинерциальностью Земли как системы отсчета

Согласно второму закону Ньютона, сила измеряется ускорением, которое она сообщает телам.

Одна и та же сила может одинаково ускорять разные тела, в этом случае говорят, что тела имеют одинаковую м а с с у. Масса некоторого тела одна и та же, независимо от того, какие и в какой момент на него действуют силы. Это утверждение далеко не столь очевидно и тривиально, каким мы привыкли его считать. Оно вытекает только из обобщения опытных фактов. На самом деле постоянство массы тела при его движении есть закон приближенный, справедливый только при скоростях, малых по сравнению со скоростью света. Это обстоятельство необходимо принимать во внимание при расчете ускорителей, а также в ядерной физике.



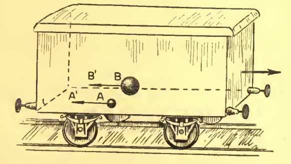


Рис. 2. Под действием одинаково растянутых пружин (вверху) ускорения шаров AA' и BB' обратно пропорциональны их массам. Если же вагон тормозится или ускоряется (внизу), то их ускорения одинаковы, как и при падении шаров под действием силы тяжести (пренебрегая сопротивлением воздуха)

Ускорения тел в неинерциальных системах отсчета обязаны не только взаимодействиям тел. Если ускорение тела, обязанное неинерциальности системы, умножить на массу тела, то получится так называемая сила инерции. Ее иногда полагают фиктивной, и напрасно: отклонение падающего камня от направления отвеса вполне реально, и вполне реальна шишка на лбу, если пассажир набьет ее при внезапной остановке поезда.

Хотя сила инерции и не фиктивна, можно говорить о физическом различии между силой инерции и силами взаимодействия. Пусть, например, два железных шара, большой и маленький, прикреплены к стенке вагона двумя одинаковыми пружинами (рис. 2). Если растянуть эти

пружины на одинаковую длину и отпустить, то ускорения шаров будут обратно пропорциональны их массам. Но те же два шара, не прикрепленные к стенке пружинами, при внезапной остановке поезда ускорятся совершенно одинаково. Это вполне очевидно, и в этом-то и заключается главное различие между силами инерции и взаимодействия. Однако существует сила взаимодействия, которая также сообщает телам одинаковые ускорения независимо от их массы. Такую силу мы знаем,— это сила притяжения тел к Земле. Впервые это поразительное свойство силы тяжести экспериментально установил Галилей, наблюдая падение тел с наклонной Пизанской башни. Все другие силы взаимодействия — упругие, электрические, магнитные, сопротивление среды движению тела — этим свойством не обладают.

Сходство силы тяготения с силами инерции — независимость сообщаемых ими ускорений от массы тел — дает ключ к тому широчайшему обобщению ньютоновой механики, которое известно под названием общей теории относительности Эйнштейна.

Физическая лаборатория в закрытом вагоне

Можно осуществить условия, при которых сила инерции и сила тяготения будут неотличимы. Представим себе совершенно закрытый вагон, который движется по горизонтальному полотну дороги с постоянным ускорением (рис. 3). В таком вагоне отвес будет отклоняться от направления, которое мы на земле называем вертикальным. Равнодействующая силы инерции и силы тяжести отклонит отвес к задней стенке вагона. В вагоне все будет так, как если бы он поднимался с постоянной скоростью в гору, а величина силы тяжести равнялась бы сумме действительной силы тяжести и силы инерции в ускоренном, но горизонтально движущемся вагоне (понятно, что надо брать геометрическую сумму векторов). Так как в обоих случаях все тела получают совершенно одинаковые ускорения, нельзя узнать, что происходит с вагоном на самом деле: движется он равномерно в гору при увеличенной силе тяжести или ускоренно — по ровному месту, если пользоваться только приборами, регистрирующими вес, и не знать подлинной величины силы притяжения к Земле.

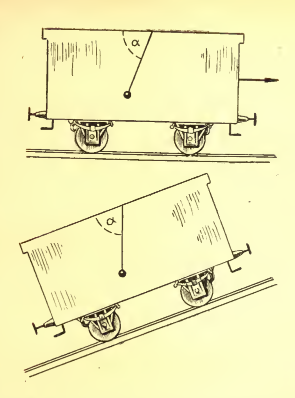


Рис. 3. Находясь в закрытом вагоне, нельзя определить по направлению силы тяжести, движется ли вагон равноускоренно по горизонтальным рельсам (верхний рисунок) или по равномерно поднимающимся в гору (нижний рисунок)

Законы природы формулируются одинаковым образом, если относить движение тел к инерциальным системам отсчета: в этом состоит принцип относительности Галилея. Эйнштейн распространил принцип относительности с начала и на электромагнитные явления. Это обобщение известно под названием специальной теории относительности. Дальнейшее обобщение возникло из сходства сил инерции и тяготения в достаточно малой области пространства (например, в вагоне). Законы движения одинаковым образом формулируются в инерциальных и неинерциальных системах отсчета, если считать тождественными

силами силы тяжести и инерции. На этом построена общая теория относительности Эйнштейна. Существенно, что для этой теории достаточно сходства сил только в сколь угодно малом объеме. Полного сходства между силами инерции и тяжести нет. Так, на вращающемся теле наблюдается хорошо известная всем центробежная сила инерции, которая возрастает при отдалении точки от оси вращения. Невозможно осуществить такую же зависимость силы тяжести от координат в пространстве, не заполненном веществом.

В общей теории относительности закон тяготения Ньютона в привычной нам форме есть лишь только первое приближение к истине. При этом не следует думать, что теория тяготения Эйнштейна заменяет ньютоново выражение силы тяжести другим, более точным выражением силы: сама сущность взаимодействия передается в общей теории относительности иначе и в простой форме силы выражена быть не может

Дальнодействие и близкодействие

Само понятие «силы», действующей между телами, выглядит неудовлетворительно при современном уровне физических знаний. Ведь ньютонов закон тяготения гласит, что сила обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами, как бы далеко друг от друга они ни находились. Одно тело, действуя на другое, как бы «заранее знает», где находится другое, и мгновенно «выбирает» нужную величину силы. Иначе говоря, по Ньютону, взаимодействие происходит в форме дальнодействия.

Если бы дальнодействие действительно осуществлялось в природе, то можно было бы указать способ мгновенной передачи сигналов на расстояние: достаточно было бы передвинуть некоторое тело, и все тела во вселенной, как бы далеко от него они ни отстояли, тотчас испытали бы некоторое изменение силы тяжести. По такому сигналу можно было бы установить по одному времени все часы во вселенной, независимо от их взаимного движения. Иначе говоря, часы были бы синхронизированными.

Фактически синхронизация часов происходит, как известно, по радио, т. е. при помощи электромагнитных

сигналов. Электромагнитные сигналы передаются не мгновенно, а с огромной по нашим масштабам, но все же конечной скоростью, равной скорости света. Если сверяемые часы покоятся друг относительно друга, легко учесть поправку на запаздывание сигнала и синхронизировать их. Но если одни часы движутся относительно других, то учет запаздывания приводит к весьма удивительным результатам.

Дело в том, что скорость света в пустоте одинакова по отношению к любому телу; это было показано в 1887 г. в знаменитом опыте Майкельсона. Результаты этого опыта были правильно истолкованы в 1905 г. Эйнштейном в специальной теории относительности. Абсолютное движение нельзя определить для электромагнитных явлений, так же как и для перемещения тел.

Если бы одно тело испускало электромагнитные волны с равной скоростью во всех направлениях, а другое с большей скоростью в одном направлении, чем в противоположном, то первое тело можно было бы считать абсолютно покоящимся, а второе — абсолютно движущимся. Опыт Майкельсона показывает прямо, а огромная совокупность других фактов — косвенно, что абсолютных покоя и движения нет.

Путем простых алгебраических выкладок можно показать, что́ произойдет при сверке двух часов, движущихся друг относительно друга, если учесть, что скорость света одинакова относительно обоих. Именно, окажется, что бо́льшее время всегда будут показывать те часы, которые при сверке считались покоящимися. Но ведь считаться покоящимися могли любые из них! Отставание часов, таким образом, взаимно и тем больше, чем ближе их относительная скорость к скорости света.

То же относится, конечно, не только к ходу часов, сделанных человеком, а и к любому периодическому физическому процессу. Но не существует иного способа определения времени, кроме как при помощи естественных или искусственных часов. Поэтому из постоянства скорости света в пустоте следует, что невозможно определить никакое универсальное, абсолютное время для вселенной. Каждое движущееся тело обладает своим собственным временем. Это один из важнейших выводов специальной теории относительности, распространившей принцип относительности Галилея на электромагнитные явления.

Итак, если пользоваться для синхронизации часов электромагнитными сигналами, то невозможно физически определить абсолютное, единое мировое время. Но тем самым ставится под сомнение и предположение Ньютона о возможности синхронизировать часы при помощи мгновенно передающейся силы тяготения (разумеется, это допущение у самого Ньютона сделано в неявном виде, и возможность подобной формулировки появилась только в результате современного анализа существа дела).

Таким образом, закон тяготения Ньютона, в его исконной форме, во всяком случае, нуждается в таком уточнении, которое исправило бы возникшее противоречие со специальной теорией относительности: физика не может допустить существования двух времен (одного абсолютного, выводимого из силы тяготения, и другого относительного, определенного по электромагнитным сигналам).

Ключевая позиция к уточнению закона тяготения опирается на сходство между силами инерции и силой тяжести.

Геометрия и физика

Электромагнитное поле как физически реальный объект определяется в каждой точке пространства и в каждый момент времени по движению пробных электрических зарядов. Аналогично поле тяжести определяется по движению пробной массы. В механике Ньютона утверждается, что в отсутствие поля тяжести (а также, конечно, других сил) пробная масса движется прямолинейно и равномерно относительно инерциальной системы отсчета. В поле тяжести пробная масса приобретает ускорение, не зависящее от величины массы. Но, как было показано, в малой области пространства ускорение тел под действием силы тяжести в инерциальной системе физически неотличимо от ускорения, обязанного неинерциальности системы отсчета. В неинерциальной системе пробная масса считается движущейся свободно.

Все развитие физической науки показывает, что закон природы сформулирован тем лучше, чем меньше его выражение зависит от того, что *считает* формулирующий: истинная закономерность в природе объективна. Исходя из этого положения, Эйнштейн сумел построить теорию тяготения так, что закон движения в поле тяже-

сти приобрел физически тождественную форму с законом свободного движения. Для того чтобы объяснить, почему в одних областях пространства, вблизи от масс, кривизна траектории пробного тела больше, чем вдали от них, было принято, что самые свойства пространства и времени меняются от точки к точке и от момента к моменту.

Таким образом, в общей теории относительности пространство и время выступают как физические объекты, свойства которых неотделимы от присутствующей в них движущейся материи: как нельзя определить движение вне пространства и времени, так нельзя определить пространство и время отдельно от движения.

Геометрия мира становится частью физики: невозможно исходить из геометрических постулатов, выдвигаемых умозрительно. Основные положения геометрии должны проверяться опытом. Привычные нам постулаты эвклидовой геометрии выступают тоже как обобщение опытных фактов, но относящихся к малой области пространства — времени. В больших областях необходимо пользоваться более точными законами геометрии. Эти законы неразрывно связаны с законами поля тяжести и составляют с ними одно целое. Если нет других полей, кроме поля тяжести, то свободное движение тел зависит исключительно от геометрии мира: зависимость между геометрией мира и движением больших масс (звезд, туманностей) и представляет эйнштейновский закон тяготения.

Искривленное пространство

Как же свойства пространства и времени определяют движение тел? Здесь имеются в виду тела пробные, т. е. те, которые испытывают действие поля тяжести, но столь малы, что не меняют его заметным образом.

Согласно традиции, принятой в популярном изложении общей теории относительности, рассмотрим воображаемое разумное двухмерное существо, живущее на поверхности шара. По определению, оно не обладает никакими органами восприятия третьего измерения. Для такого существа кратчайшее расстояние между двумя точками на шаре — отрезок дуги большого круга. Именно по дугам больших кругов совершается «свободное» движение частиц на шаре. Двухмерное существо, естественно, назовет эти дуги «прямыми». Но и не выходя за пределы

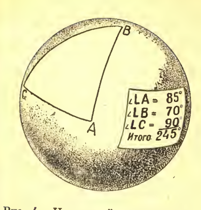


Рис. 4. На кривой поверхности сумма углов треугольника больше 180°. Измеряя эту сумму двухмерные существа, живущие на такой поверхности, могли бы, не выходя в третье измерение, узнать, что их мир неэвклидов

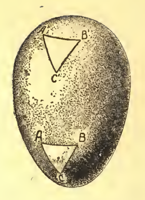


Рис. 5. На яйцевидной поверхности сумма углов у треугольника ABC больше, чем у $A'B'C'$. Таким образом, треугольники с тремя равными сторонами могут быть не равны

шара, мыслящее двухмерное существо сможет установить, что оно находится на кривой, а не на плоской поверхности, т. е. что свойства его «мира» в больших областях существенно отличаются от его свойств в очень малых участках (рис. 4). Для этого достаточно, например, совершить кругосветное путешествие или сложить углы треугольника и увидеть, что сумма их больше 180°.

Кратчайшие линии, подобные прямым, существуют не только на шаре, но и на менее симметричных поверхностях, например на яйце. Сумма углов треугольников с равными сторонами будет наибольшей вблизи острого конца такой поверхности. Существо, живущее на яйцевидной поверхности, сможет убедиться, что его «пространство» обладает различными свойствами в разных областях, т. е. неоднородно (рис. 5).

Таким же образом и мы можем убедиться, является ли наше трехмерное пространство вместе с четвертым измерением — временем (мир) плоским или искривленным. Для этого надо изучить его внутреннюю геометрию и проверить, удовлетворяет ли она постулатам Эвклида или более общим постулатам, выдвинутым еще в прошлом столетии Лобачевским и Риманом.

Но если принять, что в четырехмерном мире тела движутся по кратчайшим линиям этого пространства, то тогда, например, и движение планет вокруг Солнца должно следовать этому правилу. Но неужели можно полагать, что сила тяготения Солнца настолько велика, что в такой заметной степени «искривляет» пространство? На самом деле это рассуждение неверно, так как оно здесь проводится только для трехмерного пространства, в то время как общая теория относительности рассматривает движение в четырехмерном пространстве — времени.



Рис. 6. Чтобы показать, насколько ничтожна кривизна орбиты в четырехмерном мире, надо, чтобы расстояние между двумя положениями Солнца было в 31 000 раз больше диаметра орбиты Земли. Тогда было бы очень трудно уловить отличие винтовой линии от прямой

Кратчайшая линия в четырехмерном мире гораздо меньше отличается от прямой, чем можно было бы подумать по кривизне планетных орбит. Действительно, положение Земли в мире за один оборот изменяется во времени на расстояние длиною в год. Чтобы выразить это расстояние в километрах, надо, как учит специальная теория относительности, умножить скорость света на число секунд в году. Оно в 31 тыс. раз больше диаметра земной орбиты. Путь Земли в мире можно уподобить винтовой линии с огромным отношением шага к радиусу (рис. 6). Такая линия очень мало отклоняется от воображаемой прямой, проведенной через ее концы. У более отдаленных планет кривизна винтовой линии еще меньше, т. е. мир ближе к плоскому.

Таким образом, общая теория относительности весьма своеобразно отвечает на вопрос о том, «что такое тяготение». Абсурдно искать еще какое-то «объяснение» силы тяжести на основе наивных механических моделей, то ли путем введения мифических частиц, летящих от одного

тела к другому, то ли при помощи воображаемой среды, вроде давно оставленного физикой мирового эфира. К сожалению, некоторые авторы «научно-популярных» статей еще выдают подобную отсебятину за последнее слово науки.

Столь же абсурдны проникшие к нам из иностранной печати слухи об искусственном уничтожении тяжести тел. Для этого надо было бы сверхъестественным образом помещать эти тела вне пространства и времени, т. е. вне мира!

Такие сообщения не надо, конечно, путать с фактической невесомостью тел на космических кораблях. Так как все тела в поле тяжести имеют одинаковое ускорение, пассажир космического корабля не испытывает силы, прижимающей его к стенкам кабины, в отличие от человека, стоящего на Земле. Вес на Земле уравновешивается реакцией опоры, которая нами и воспринимается. Такие же сила и реакция действуют и между различными частями человеческого тела на Земле, но будут отсутствовать на космическом корабле. Это и понимается под невесомостью.

Некоторые выводы из теории относительности

Математическая формулировка общей теории относительности весьма непохожа по внешнему виду на привычные уравнения ньютоновой механики. Однако в применении к движению планет уравнения теории тяготения Эйнштейна упрощаются настолько, что результаты почти точно совпадают с ньютоновыми. Сколько-нибудь заметное отличие имеется только у Меркурия: его перигелий дополнительно поворачивается на 43″ в столетие по сравнению с тем, что дает возмущение со стороны остальных планет по ньютоновой механике. Такое отклонение в движении Меркурия от предвычислявшегося наблюдалось уже давно, но было объяснено без дополнительных гипотез только теорией относительности.

Луч звезды, проходящий вблизи Солнца, согласно теории относительности, должен отклониться. В этом убедились, фотографируя одну и ту же область неба во время полного солнечного затмения и через полгода после него: положения звезд действительно оказываются смещенными по направлению от Солнца на фотографиях, сделанных во время затмения.

В обоих случаях речь идет о весьма небольших, хотя и наблюдаемых эффектах. Но теория относительности особенно важна в применении к проблеме эволюции больших областей вселенной, сравнимых по величине с той областью, которая доступна наибольшим современным телескопам.

Давно известно, что далекие галактики отдаляются от нас со скоростью, приблизительно пропорциональной расстоянию. Но еще в 1922 г. ленинградский ученый А. А. Фридман показал, что в пространстве с равномерно распределенной материей можно построить решение уравнений гравитации (тяготения), обладающее как раз свойством равномерного расширения во все стороны. Пока не доказано полное соответствие между решением Фридмана и наблюдаемой картиной мира, но по крайней мере совершенно ясно, что заниматься космологией, не обращаясь к общей теории относительности, во всяком случае, не научно.

В зависимости от средней плотности материи во вселенной общий объем мира, по решению Фридмана, может быть конечным или бесконечным [1]. Ни тот, ни другой вывод не могут быть приняты или отвергнуты умозрительно только на том основании, что в прошлом мир всегда считался бесконечным в пространстве и во времени. Тогда не было отчетливой идеи о необходимости изучения истинных свойств пространства и времени на основании опытных данных, а не исходя из геометрических «аксиом».

Часто спрашивают: что находится за пределами конечного мира? Но в том-то и суть, что у конечного мира нет пределов в четырех измерениях, так же, как их нет на поверхности шара в двух измерениях. Так же абсурдно было бы спросить, что находится за краем Земли.

Конечность мира не означала бы его ограниченности, а свидетельствовала бы только о невозможности физически определить бесконечно большое расстояние. Но во всех случаях получается, что есть конечный промежуток времени порядка 10—12 млрд. лет, который отделяет нас от того момента, когда плотность материи была сколь угодно большой. Экстраполировать нашу теорию на бо-

---

[1] См. статью Д. А. Франк-Каменецкого (стр. 304 данного сборника).— *Прим. ред.*

лее ранние промежутки времени мы не можем, так как уравнения теряют силу при бесконечной плотности. Тем более бессмысленно пытаться решить вопрос о том, что было в более ранние моменты времени умозрительно: если физическая теория не может определить понятия «раньше» для некоторой проблемы, то какую цену имеют чисто словесные построения?

Очень важно, конечно, исследовать и все другие решения уравнения Эйнштейна, кроме фридмановского, и выяснить, какие возможности они открывают перед космологией. Эти исследования производятся в наше время многими физиками-теоретиками, и от них можно ожидать в ближайшем будущем чрезвычайно интересных результатов.

Существуют решения космологических уравнений, которые на поздних стадиях расширения имеют одинаковые свойства во всех направлениях, подобно тому как на более ранних стадиях они существенно отличаются от фридмановского решения, обладая высокой степенью асимметрии. Это приводит к иным свойствам материи и пространства-времени, чем фридмановское решение. Но физических оснований для окончательного выбора решения пока совершенно недостаточно. Что касается других критериев (философских или эстетических), то относиться к ним сколько-нибудь серьезно нельзя.

Поиски управляемой термоядерной реакции*

Академик
Л. А. Арцимович,
доктор физико-математических наук
С. Ю. Лукьянов

Прошлое и будущее энергетики

Сотни тысяч лет отделяют нас от того дня, когда первобытный человек впервые с восторгом смотрел на пламя зажженного им костра. Прекрасный эллинский миф о Прометее является отзвуком этого события, хранимого памятью человечества.

Прошли тысячелетия, на смену первобытному обществу пришла цивилизация, все ускоряющимся темпом шло развитие производительных сил. Но, как это ни странно и ни кажется парадоксальным на первый взгляд, в использовании природных энергетических ресурсов почти ничто не изменилось до самых последних дней, хотя энергетика — это основа промышленности и все производственные достижения неразрывно связаны с ее успехами. Действительно, если сравнить костер дикаря и ультрасовременную тепловую электростанцию, то мы убедимся, что принципиальная разница между ними отсутствует. В обоих случаях для получения тепла и света сжигаются те или иные органические вещества, используются одни и те же физические и химические процессы, сводящиеся, в конечном счете, к соединению атомов углерода и кислорода в устойчивые, прочные молекулы углекислоты.

По существу почти все крупнейшие изобретения в области энергетики за последние 150—200 лет были направлены

* «Природа», 1957, № 1.

не на поиски новых источников энергии, а на лучшие методы ее использования и транспортировки. Источники энергии оставались прежними — это было все то же растительное топливо, которое можно заготовить, срубив дерево в ближайшем лесу или извлекая из шахт и буровых скважин остатки растений — каменный уголь и нефть, давно опустившиеся в недра Земли. Если экстраполировать в будущее современные темпы развития энергетической мощности,— а они весьма велики,— то даже огромные запасы растительного топлива, которые имеются на Земле, все же исчезнут за сравнительно короткий период. Использование запасов гидроэнергии не меняет общей картины, так как и эти ресурсы ограничены.

Первый и чрезвычайно важный шаг в поисках принципиально новых источников энергии был сделан совсем недавно. Буквально на наших глазах зародилась и начала быстро развиваться атомная энергетика, основанная на использовании избыточной энергии тяжелых атомных ядер таких элементов, как уран, торий или плутоний. В атомной электростанции при работе реактора энергия выделяется в результате цепной реакции деления тяжелых ядер. Мы присутствуем сейчас лишь при рождении атомной энергетики, но несомненно, что новому виду энергии принадлежит великое будущее. Количество энергии, выделяющееся за один акт деления, в десятки миллионов раз превышает энергию, которая выделяется при соединении атомов в молекулы. Поэтому, несмотря на малое содержание урана или тория в земной коре, имеющиеся запасы тяжелых элементов могут обеспечить безбедное энергетическое существование для растущего населения Земли на протяжении многих сотен лет.

Может быть, на этом следует остановиться и не искать новых источников энергии? Конечно, нет. Ни один новый источник энергии не окажется лишним в будущем. С этой точки зрения исключительный интерес представляет вопрос о возможности использования не реакции деления, а реакции слияния самых легких ядер, принадлежащих элементам начала периодической системы Менделеева. Заметим, что запасы легких элементов практически неисчерпаемы.

Среди различных реакций слияния, когда из легких ядер синтезируются более тяжелые, особенно привлекательной и выгодной является реакция соединения ядер

дейтерия — изотопа водорода, содержащегося в природе в виде небольшой примеси к обычному водороду. Первыми сведениями о процессе взаимодействия дейтонов — ядер дейтерия — физика обязана великому основателю современного учения об атомном ядре Эрнесту Резерфорду. Взаимодействие дейтонов происходит по одной из следующих реакций:

$$H^2 + H^2 \rightarrow He^3 + n,$$

$$H^2 + H^2 \rightarrow H^3 + p,$$

идущих с почти одинаковой вероятностью и выделением в первом случае 3,3 *Мэв* энергии на каждый акт синтеза, а во втором — 4,0 *Мэв*. Количество энергии, выделяющейся на 1 *г* прореагировавшего вещества, здесь примерно такое же, как и в случае реакции деления. Приведем наглядный пример, иллюстрирующий энергетические соотношения в рассматриваемом случае. Если бы можно было использовать весь дейтерий, содержащийся в воде, заливаемой в радиатор легковой машины (дейтерия содержится там около 200 *мг*), то выделившейся энергии хватило бы для поездки на расстояние в 50 тыс. *км*.

Термоядерные реакции

Возникает вопрос, каким образом можно осуществить реакцию синтеза. На первый взгляд это кажется сравнительно простым. Для ядерного взаимодействия двух дейтонов необходимо, чтобы между ними произошло столкновение на достаточно близком расстоянии, так как лишь в этом случае проявится мощное действие специфических сил ядерного притяжения. При сближении ядер на расстояние порядка 10^{-13} *см* действие этих сил оказывается огромным; на бо́льших расстояниях они практически равны нулю. Однако для того чтобы дейтоны могли подойти друг к другу так близко, они должны предварительно преодолеть действие обычных сил электростатического отталкивания (одноименно заряженные дейтоны отталкиваются друг от друга с силой обратно пропорциональной квадрату расстояния межу ними). Поэтому ядерное взаимодействие дейтонов может произойти только в том случае, если относительная скорость сталкивающихся частиц настолько велика, что их кинетическая энергия

будет больше потенциальной энергии, обусловленной наличием электрических сил отталкивания. Таким образом, необходимо, чтобы сталкивающиеся дейтоны двигались с большой скоростью друг относительно друга, т. е. чтобы они обладали большой кинетической энергией. И действительно, направляя пучок дейтонов, ускоренных разностью потенциалов в несколько десятков киловольт, на мишень, содержащую дейтоны (например, приготовленную из тяжелого льда), легко зарегистрировать появление быстрых нейтронов и протонов.

Казалось бы, задача решена: на ускорение дейтона затрачивается энергия в несколько десятков килоэлектронвольт, выигрыш же составляет 3—4 *Мэв*. Но существует оборотная сторона медали: в среднем лишь один из многих тысяч дейтонов, падающих на мишень, вызовет ядерную реакцию. Остальные непроизводительно израсходуют запасенную в них энергию на ионизацию и возбуждение бомбардируемых атомов, в конечном счете просто нагревая мишень. Это происходит потому, что дейтоны сближаются на достаточно малое расстояние только при «лобовом» столкновении. Пока произойдет это счастливое событие, дейтон должен пройти длинный путь в мишени, и на всем пути он будет растрачивать энергию малыми порциями, передавая ее электронам тех атомов, мимо которых он проносится. В результате энергетический коэффициент полезного действия ядерных реакций, осуществленных таким путем, оказывается очень низким.

В принципе, однако, существует возможность преодолеть эту трудность. Пусть в некотором объеме находится газообразный дейтерий, нагретый до очень высокой температуры, измеряемой миллионами градусов. В этом случае газ уже не будет состоять из нейтральных атомов, а будет представлять собою смесь электронов и положительно заряженных ядер (дейтонов). Вещество, находящееся в таком состоянии, называется плазмой. Чем выше температура плазмы, тем больше кинетическая энергия ее частиц (электронов и дейтонов).При достаточно высокой температуре плазмы скорости хаотически движущихся дейтонов сделаются настолько большими, что случайные столкновения дейтонов между собой начнут сопровождаться ядерными реакциями. Такие реакции, происходящие в веществе только при высоких температурах, и называются термоядерными реакциями.

Температура плазмы, при которой термоядерные реакции могут протекать с заметной интенсивностью, очень велика. При обычных температурах мы не будем наблюдать в газе ни одной ядерной реакции; недостаточной оказывается и температура в десятки и даже в сотни тысяч градусов. Лишь при температуре в несколько миллионов градусов можно надеяться обнаружить первые признаки ядерных взаимодействий. Нужны десятки или даже сотни миллионов градусов, чтобы происходящие процессы сделались энергетически выгодными.

Итак, чтобы получить термоядерную реакцию, нужно нагреть вещество до огромной температуры, никогда ранее не достигавшейся в лабораторных условиях и сравнимой лишь с теми температурами, которые господствуют в недрах Солнца или других звезд. Правда, в настоящее время подобные температуры получены искусственно в водородной бомбе, но происходящие там процессы и ядерные реакции носят характер взрыва чудовищной разрушительной силы. Сейчас же мы обсуждаем вопрос об использовании термоядерных реакций для нужд энергетики, т. е. обсуждаем вопрос о путях создания медленно протекающей регулируемой термоядерной реакции.

Чем заменить силы тяготения

Трудности в достижении сверхвысоких температур связаны не с величиной энергии, которая должна быть запасена в нагретом реагирующем веществе (эта энергия оказывается при разумных количествах реагирующего вещества весьма скромной), а с необходимостью каким-то путем устранить тепловые потери в процессе нагревания плазмы и во время протекания ядерной реакции. Другими словами, необходимо удерживать быстрые частицы внутри термоядерного реактора в течение такого промежутка времени, который достаточен для того, чтобы заметная доля частиц успела прореагировать между собой. В противном случае вредные потоки тепла к стенкам сосуда, в котором находится плазма при высоких температурах, окажутся гигантскими и будут стремительно возрастать с увеличением температуры.

На Солнце и звездах силы тяготения не позволяют раскаленной плазме расшириться, и термоядерные реакции протекают в центральных зонах этих тел на неизменном

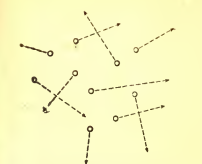


Рис. 1. Схематическое изображение хаотического движения молекул газа

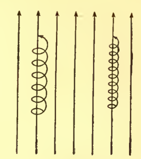


Рис. 2. Схематическое изображение движения ионов в магнитном поле

уровне в течение миллиардов лет. Чем же заменить силы тяготения в земных условиях? Одна из основных идей, связанных с решением этого вопроса, была высказана А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом в 1950 г. Она состоит в применении магнитных сил.

На рис. 1 схематически изображен характер движения частиц плазмы в отсутствие магнитного поля. Заряженные частицы движутся хаотически по самым разнообразным направлениям, ничто их не удерживает, только столкновения вызывают изменение направления их полета.

Совершенно иной будет картина движения частиц плазмы, если поместить ее в сильное магнитное поле. В плоскости, перпендикулярной к силовым линиям, частицы движутся по окружностям. Радиус этих окружностей пропорционален составляющей скорости, перпендикулярной к направлению магнитного поля, и обратно пропорционален величине магнитного поля. Так как частицы могут иметь еще продольную составляющую скорости, направленную вдоль силовой линии, то в результате они будут двигаться не по окружности, а по винтовой линии. Частицы оказываются как бы привязанными к силовым линиям (рис. 2) и могут смещаться в перпендикулярном направлении лишь за счет столкновений, передвигаясь при каждом столкновении только на величину порядка диаметра витка винтовой линии. Скорость ухода частиц

по направлению, перпендикулярному к силовым линиям, при этом будет резко сниженной, и если стенки сосуда расположены параллельно силовым линиям, то термоизоляция плазмы будет достигнута.

При обсуждении различных способов осуществления идеи о магнитной термоизоляции нагретой плазмы, естественно, возникает мысль воспользоваться для этой цели электрическим током достаточно большой силы, пропущенным через газообразный дейтерий. Ток будет и нагревать вещество и порождать вокруг себя магнитное поле, создавая ту невидимую, но непроницаемую преграду, которая удержит частицы от слишком тесного взаимодействия со стенками сосуда.

Несколько подробнее процессы, которые должны происходить в этих условиях, можно описать следующим образом. За счет взаимодействия тока с собственным магнитным полем должно происходить его сжатие; иными словами, ток будет сжиматься под действием электродинамических сил, существующих между отдельными нитями тока («параллельные токи притягиваются»). Если сжимается ток, идущий по газу, то вместе с собой он будет увлекать и вещество, оттягивая плазму от стенок сосуда. Таким образом, с одной стороны, за счет стягивания вещества возникает термоизоляция плазмы, с другой стороны, ток будет нагревать газ (как за счет работы сил сжатия, так и за счет джоулева тепла).

Таковы были в общих чертах те представления, на основе которых группа советских физиков и инженеров приступила к экспериментальным и теоретическим исследованиям в данном направлении.

Первые опыты

На начальной стадии предполагалось, что процесс сжатия носит квазистационарный характер, что в каждый данный момент времени магнитное давление, сжимающее плазму, уравновешивается газовым давлением. Математическая формулировка этого предположения приводит к выводу, что температура вещества должна возрастать пропорционально квадрату силы тока, текущего через плазму. Если считать, что температура всех частиц плазмы — электронов и атомных ядер — одинакова,

то получается следующее простое выражение для температуры:

$$T = \frac{J^2}{4000sp}.$$

Здесь T — температура частиц плазмы в градусах, J — сила тока в амперах, p — начальное давление газа в миллиметрах ртутного столба (газ считаем двухатомным), s — сечение сосуда, по которому течет ток. Как видно из написанного равенства, для получения температуры в 10 млн. градусов при давлении в 0,1 *мм рт. ст.* следует пропускать ток в 1 млн. *а* через цилиндрический сосуд диаметром 200 *мм*. Мгновенная мощность, которая должна выделяться в этих условиях в газе, огромна и превышает мощность любой гидростанции мира. Разумеется, не может быть и речи о подведении энергии к разрядной трубке на таком уровне в течение длительного времени. Только при кратковременном разряде, длящемся миллионные доли секунды, можно обеспечить необходимую мощность.

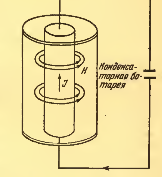


Рис. 3. Схема опыта

Поэтому первые экспериментальные установки представляли собой импульсные генераторы большой мощности. Источником энергии в них служат конденсаторные батареи емкостью от нескольких десятков до нескольких сотен микрофарад, которые заряжаются до напряжений от 20 до 50 тыс. *в*. Конденсаторная батарея присоединяется к разрядной трубке через искровой разрядник, включаемый в нужный момент времени. Разрядная трубка диаметром в несколько десятков сантиметров и длиной около метра обычно изготовляется из фарфора; для наблюдения за свечением разряда в ней делаются стеклянные окна.

Нарастание тока в трубке занимает время от нескольких микросекунд до десятков микросекунд. Мгновенная мощность разряда достигает миллионов киловатт, а в отдельных опытах даже десятков миллионов киловатт. Схема опыта ясна из рис. 3.

Для изучения явлений, происходящих в таких электрических разрядах, необходима специальная осциллогра-

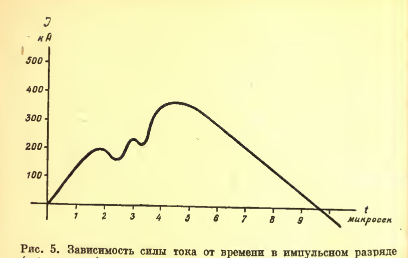


Рис. 5. Зависимость силы тока от времени в импульсном разряде (схематически)

фическая методика, позволяющая регистрировать быстрые изменения силы тока, напряжения и интенсивности спектральных линий на протяжении нескольких микросекунд. Необходимо также уметь регистрировать кратковременные импульсы давления, возникающие в плазме, и получать мгновенные фотографии всей картины разряда в различные моменты времени.

Остановимся прежде всего на общей картине протекания разряда, такой, как она представляется из рассмотрения следующих друг за другом кадров сверхскоростной киносъемки (рис. 4). Время экспозиции отдельных кадров составляет около 0,2 *мксек*. Как видно из рисунков, в перые моменты времени поперечник светящегося столба велик: свечение газа достигает стенок разрядной трубки, затем свечение стягивается в сравнительно узкий светящийся шнур, «оторванный» от стенок сосуда. Измеряя диаметры светящегося шнура в различные моменты времени, можно оценить скорость, с которой сжимается плазма. Эта скорость оказывается очень большой. Она зависит от скорости нарастания тока и плотности газа. Чем быстрее нарастает ток, тем больше скорость сжатия; чем больше плотность газа, находящегося в сосуде, т. е. чем больше масса вещества, тем медленнее газ сжимается. При скорости нарастания тока около 10^{11} ампер в секунду и на-

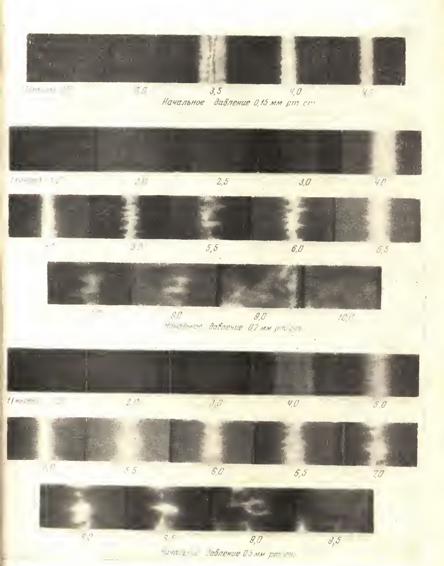


Рис. 4. Сверхскоростная киносъемка разряда в дейтерии при трех значениях начального давления газа

t — время (в микросекундах), прошедшее с начала процесса. Начальное напряжение на конденсаторной батарее 40 *кв*



Рис. 6. Распределение тока по сечению разряда в различные моменты времени (схематически)

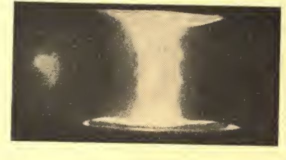


Рис. 7. Момент сжатия канала разряда. Экспозиция 0,2 *мксек.* $P_0 = 1$ *мм рт. ст.*

чальном давлении дейтерия около 0,1 *мм рт. ст.* скорость сжатия в трубках диаметром 200 *мм* достигает 80—120 *км/сек.*

Поведение разряда можно характеризовать и электрическими параметрами, исследуя изменение тока и напряжения во время процесса. На рис. 5 показано нарастание тока разряда со временем. Вначале нарастание тока происходит плавно, но потом наблюдаются изломы, «нерегулярности» на кривой тока. Помещая внутри разряда небольшие катушки, спрятанные в специальные изолирующие экраны, можно измерить величину магнитного поля в различных местах сечения разрядной трубки и получить представление о распределении плотности разрядного тока. Разумеется, при выполнении таких опытов остаются сомнения в том, не искажает ли существенно

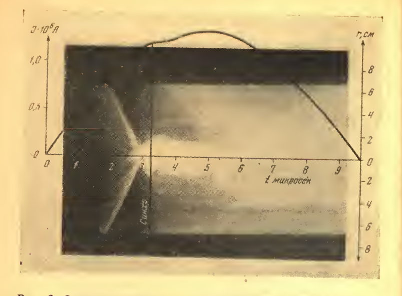


Рис. 8. Осциллограмма тока и фоторазвертка разряда в дейтерии. $P_0 = 1$ *мм рт. ст.*, расстояние между электродами 123 *мм*, $J_{max} = 1{,}4 \cdot 10^6$ А

получаемые результаты само введение датчиков внутрь плазмы. Однако специальными опытами было показано, что распределение интенсивности свечения плазмы весьма точно воспроизводит распределение плотности тока в разряде. Поэтому результаты измерений магнитного поля могут быть проконтролированы путем совершенно независимых оптических измерений, в которых изучается свечение, исходящее из различных участков невозмущенной плазмы, и его интенсивность регистрируется при помощи фотоумножителей.

Совокупность данных, получаемых обоими методами, иллюстрируется схематическими рисунками, дающими представление о развитии процесса разряда по стадиям и дополняющими результаты сверхскоростной киносъемки (рис. 6)[1]. Первая стадия, как нам уже известно, начинает-

[1] Эти рисунки взяты из статьи Борзунова, Орлинского и Осовца, опубликованной в журнале «Атомная энергия» (1958, № 2).

ся со стенок сосуда: ток идет по поверхности газа, внутри ток отсутствует (см. рис. 6, *а*). Подобное распределение тока объясняется тем, что здесь мы имеем дело с токами высокой частоты (наблюдается так называемый скин-эффект, хорошо знакомый электротехникам). Затем токовая трубка несколько стягивается, главная часть тока теперь течет на некотором расстоянии от оси; внутри тока попрежнему нет (см. рис. 6, *б*). Наконец наступает такая стадия сжатия, когда ток оказывается почти полностью сосредоточенным в центральной зоне (рис. 6, *в* и рис. 7). В этот момент времени на кривой тока (см. рис. 5) наблюдается первый излом. Обычно за первым изломом следует второй, иногда третий. Этим изломам отвечают пространственные пульсации тока в центральной зоне. На более поздних стадиях разряда плазменный шнур теряет правильную устойчивую форму и начинает извиваться подобно змейке (рис. 6, *г*). С этого времени уже сказывается сильное взаимодействие плазмы со стенкой.

На рис. 8 приведена осциллограмма тока и непрерывная фоторазвертка разряда в дейтерии, иллюстрирующая полученную на опыте картину разряда, схематически описанную выше.

Свойства сжимающейся плазмы

Как мы видим, изложенные экспериментальные факты в известной мере соответствуют теоретическим ожиданиям, основанным на представлении о квазистационарном протекании процесса. Однако при более внимательном рассмотрении оказывается, что теория должна быть существенно дополнена: помимо сил магнитного и газового давления необходимо учитывать силы инерции. С учетом этих сил можно следующим образом описать происходящие явления.

Вскоре после пробоя, пока основная доля тока течет вблизи стенок трубки, пока внутри находится еще не возмущенный газ и газовое давление очень мало, магнитные силы не уравновешиваются силами газового давления и вызывают ускоренное движение плазмы к оси сосуда. Плазменная стенка стягивается и увлекает за собой нейтральный газ. Значительная часть работы магнитных сил в этой стадии процесса расходуется не на повышение давления газа, а на создание кинетической энергии упорядо-

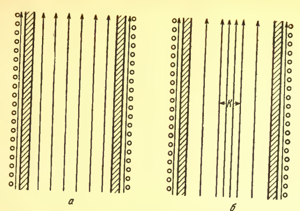


Рис. 9. Схематические изображения парамагнитных свойств плазмы

а — силовые линии продольного магнитного поля до разряда в трубке; *б* — силовые линии продольного магнитного поля во время сжатия плазмы; *К* — область, занятая разрядом

ченного потока частиц, стремительно несущихся к оси трубки. Так как ионы обладают большой массой, а электроны—маленькой и все они летят с одинаковой скоростью (плазма все время остается в целом нейтральной!), то кинетическая энергия, приобретаемая ионами, оказывается гораздо бо́льшей, чем кинетическая энергия, приобретаемая электронами. В результате получается плазма совершенно иная, чем та, с которой мы привыкли сталкиваться в газовом разряде,— плазма, в которой обычные энергетические соотношения вывернуты наизнанку, плазма «с горячими» ионами и «холодными» электронами.

Следует иметь в виду, что на начальной стадии процесса ионизована только небольшая часть атомов газа, наполняющего разрядную трубку. Степень ионизации, особенно в центральной зоне, как показывают оптические измерения, однако, заметно возрастает к моменту, когда происходит последняя стадия сжатия.

Интересные явления обнаруживаются в том случае, когда разрядная трубка помещается во внешнее магнитное поле, направленное вдоль ее оси. Такое поле может быть создано путем пропускания тока через длинную катушку (соленоид), охватывающую разрядную трубку (рис. 9, *а*). Как показывает опыт, в этих условиях сжатие

плазмы во время разряда происходит с меньшей скоростью, чем в отсутствие магнитного поля.

Такое уменьшение скорости сжатия можно предвидеть заранее. Оно обусловлено тем, что сжимающийся шнур, благодаря высокой проводимости плазмы, стремится сохранить внутри себя все те силовые линии, которые первоначально пронизывали сечение трубки, т. е. сохранить внутри себя постоянное значение магнитного потока (рис. 9, *б*). Иными словами, это означает, что при уменьшении сечения шнура напряженность продольного магнитного поля в плазме (число силовых линий на 1 $см^2$ сечения) должна возрастать. Сжимающуюся плазму можно в известной мере уподобить веществу с парамагнитными свойствами (напомним, что силовые линии магнитного поля втягиваются в парамагнитное вещество и выталкиваются диамагнитным веществом). Так как напряженность продольного магнитного поля внутри плазмы больше, чем снаружи, то создается избыточное давление, направленное наружу, противодействующее электродинамическим силам, сжимающим плазму, и поэтому уменьшающее скорость сжатия. Как уже было сказано, этот вывод теории оправдывается прямыми экспериментами.

Вернемся к тому центральному вопросу, с которого начался весь рассматриваемый цикл исследований и который представляет, разумеется, наибольший интерес. Какой температуры удается достигнуть в опытах с импульсными разрядами? Достаточна ли эта температура для начала термоядерной реакции?

Стадия магнитного ускорения плазмы заканчивается в тот момент, когда внутренняя граница сжимающейся плазменной трубки достигает оси. На этой последней и очень короткой стадии сжатия значительная часть энергии направленного движения ионов превращается в тепло, что приводит к резкому повышению давления и температуры плазмы[1].

Совокупность имеющихся экспериментальных данных указывает на то, что в момент максимального сжатия температура плазмы в некоторых опытах достигала на короткое время величины порядка 1 млн. градусов (для

---

[1] Во избежание недоразумений необходимо отметить, что, говоря о температуре плазмы, мы имеем в виду температуры тяжелых частиц — ионов и нейтральных атомов.

водорода или дейтерия при начальном давлении газа около 0,1 *мм рт. ст.*). Это — огромная температура, никогда ранее не наблюдавшаяся в лабораторных условиях.

Так, может быть, мы совсем близки к достижению желаемой цели — получению интенсивной термоядерной реакции, вызываемой и регулируемой по нашему произволу?

К сожалению, это не так, и мы лишний раз убедились в том, сколь велики трудности, возникающие при исследовании этой области физики, когда были обнаружены новые, не предусмотренные теорией явления, на первый взгляд удивительно похожие на те, которые мы ожидали найти.

Жесткое излучение импульсного разряда

Начало реакции слияния ядер дейтерия должно быть ознаменовано появлением нейтронов. И действительно, нейтронное излучение, сопутствующее газовому разряду и свидетельствующее о начале ядерных взаимодействий в разрядной камере, было обнаружено еще в 1952 г. Однако довольно скоро нам пришлось убедиться, что это излучение обусловлено, по крайней мере в своей основной части, не началом термоядерной реакции, а другими причинами.

Действительно, во-первых, число наблюдавшихся нейтронов в ряде опытов во много раз превышало то их количество, которое могло бы возникнуть в результате термоядерных реакций. Во-вторых, строго одновременно с нейтронным излучением возникает сравнительно жесткое рентгеновское излучение.

Остановимся на этом вопросе несколько подробнее. Нейтронное и рентгеновское излучения возникают в момент второго сжатия плазменного шнура, в момент второго излома тока. Длительность импульсов излучений не превышает нескольких десятых долей микросекунды.

Появление жестких рентгеновских лучей (с максимальной энергией фотонов в несколько сотен килоэлектронвольт) требует существования в разряде электронов, набравших каким-то образом по крайней мере такую же энергию. Но разность потенциалов, приложенная к трубке в этот момент, не превышает 10—15 *кв*. Следовательно, должен существовать какой-то ускорительный механизм, разгоняющий электроны. Быть может, этот же ускори-

тельный механизм приводит и к ускорению дейтонов, к появлению группы быстрых дейтонов в плазме, ядерные взаимодействия которых с другими дейтонами плазмы и обнаруживаются в виде нейтронного излучения.

Для того чтобы происходило ускорение частиц в плазме, необходимо, однако, выполнение определенных условий. Сильное собственное магнитное поле тока, силовые линии которого имеют форму концентрических окружностей, в общем случае исключает прямое ускорение частиц вдоль разрядной трубки, т. е. поперек силовых линий. Процесс ускорения может разыгрываться только в узком канале вблизи оси разряда, где магнитное поле близко к нулю и где могут возникать сильные электрические поля индукционного происхождения, обусловленные, например, быстрыми пространственными пульсациями тока, о которых шла речь выше. Второе необходимое условие для ускорения заряженных частиц в плазме заключается в том, что плотность вещества в области, где происходит ускорение, должна быть очень мала. Быть может, непосредственно перед вторым моментом сжатия такие условия действительно реализуются в плазме.

Следует еще раз подчеркнуть, что высказанные соображения о механизме возникновения излучений носят предположительный характер, и дальнейшие исследования могут внести существенно новые черты в рассматриваемую картину явления.

Таково положение с экспериментальными и теоретическими исследованиями в настоящее время. Одним из важных результатов этих исследований является получение очень высоких температур, превышающих 1 млн. градусов. Мы не знаем, однако, удастся ли, двигаясь по этому пути, повысить температуру до такого уровня, при котором начнутся интенсивные термоядерные реакции, представляющие практический интерес. Быть может, потребуется новый подход ко всему кругу рассматриваемых вопросов, потребуется привлечение каких-то принципиально новых идей.

Но независимо от этой пока что далекой конечной цели исследования, результаты уже проделанной работы и, прежде всего, обнаружение жестких излучений плазмы представляют интерес как для физики газового разряда, так и для ряда астрофизических вопросов.

Устойчивая плазма*

Доктор физико-математических наук
Д. А. Франк-Каменецкий

Одна из важнейших проблем современной физики — проблема управления термоядерными реакциями, которые дадут человечеству практически неисчерпаемый источник энергии. Для решения этой задачи необходимо научиться работать с раскаленной плазмой, температура которой измеряется килоэлектронвольтами, т. е. в обычных единицах — десятками миллионов градусов. Никакая твердая стенка не может выдержать такие температуры, поэтому удержание термоядерной плазмы возможно только в магнитных ловушках, где роль «стенки» выполняет магнитное поле. До сих пор все усилия физиков в этом направлении разбивались об одно препятствие — неустойчивость плазмы.

Если впустить в магнитную ловушку несколько заряженных частиц, то они будут крутиться вокруг силовых линий магнитного поля и одновременно двигаться вдоль них. Магнитные силовые линии можно сравнить с рельсами, а кружочки, по которым вращаются частицы,— с колесами поезда, движущегося по этим рельсам. Пока «рельсы» прямые, «поезд» не может сойти с них, т. е. плазма удерживается в ловушке. И действительно, теория и опыт показывают, что одна частица или небольшое их число удерживаются в ловушке практически неограниченное время. Но для термоядерной реакции нужна плотная плазма, содержащая много миллиардов частиц в каждом кубическом сантиметре. Движение такого

* «Природа», 1963, № 8.

множества заряженных частиц создает электрические токи, возмущающие магнитное поле. Хуже всего то, что такое поле в свою очередь возмущает плазму, а плазма еще сильнее возмущает поле. Возникает механизм, который в кибернетике называется обратной связью, а в физике — неустойчивостью. Частицы плазмы сходят с «рельсов» и ударяются о стенки ловушки со всеми вытекающими отсюда последствиями.

До сих пор удавалось удержать плазму в магнитных ловушках в течение весьма краткого времени — около десятитысячной доли секунды. Борьба с неустойчивостью — основная задача физики плазмы.

В самое последнее время советским физикам удалось достичь первых блестящих успехов в этой борьбе. В Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова в отделе плазменных исследований, которым руководит академик Л. А. Арцимович, группа физиков — М. С. Иоффе, Ю. Т. Байбородов, Р. И. Соболев и В. М. Петров увеличили время «жизни» плазмы в магнитной ловушке примерно в 100 раз, доведя его до нескольких сотых долей секунды.

Успех, достигнутый М. С. Иоффе и его сотрудниками, основан на многократно уже обсуждавшейся в литературе идее комбинированных магнитных полей. До сих пор испытывались ловушки двух типов — либо с прямыми, либо со встречными полями. Прямые поля создаются токами, текущими в одном направлении. Таким полем легко окружить плазму со всех сторон. Но при этом силовые линии оказываются выпуклыми, а это значит, что магнитное поле ослабевает в направлении к периферии. В такой ловушке плазма «всплывает», как легкая жидкость, налитая под тяжелую. В этом и проявляется неустойчивость. Встречные поля создаются проводниками, в которых токи текут попеременно в противоположных направлениях. Здесь силовые линии вогнутые, а следовательно, магнитное поле к периферии усиливается. При такой конфигурации поля неустойчивость не проявляется. Но зато в ловушке с встречными полями всегда есть «дырки», через которые плазма свободно уходит из ловушки.

Группа М. С. Иоффе создала ловушку с комбинированными полями. Здесь к катушке, создающей прямое поле, добавлен «частокол» из прямых проводников с взаимно противоположными токами, которые возбуждают встречные

поля. Основное прямое поле удерживает плазму, дополнительные «стабилизирующие» встречные поля устраняют неустойчивость. Успех этой изящной идеи превзошел все ожидания. Исследователи наблюдали, как влияет на уход плазмы из ловушки возрастание стабилизирующих встречных полей. Оказалось, что когда достигается отношение суммарного поля к прямому около 1,1, время удержания скачком возрастет в 25—30 раз. В дальнейшем уход плазмы из ловушки уже не связан с неустойчивостью, а происходит от взаимодействия с нейтральными частицами, загрязняющими плазму. Более тщательная очистка плазмы от этих загрязнений открывает перспективу дальнейшего удлинения времени «жизни» плазмы в ловушке. Специальными измерениями было показано, что в прямом поле плазма «бурлит», как кипящая вода, а при включении стабилизирующего поля успокаивается.

Открытие советских физиков имеет большое принципиальное значение. До сих пор высказывались сомнения, действительно ли уход плазмы из ловушек связан с той неустойчивостью, которую предсказывает теория. Теперь таким сомнениям нет места. Чтобы понять механизм ухода, нужно было научиться воздействовать на него. Впервые в истории термоядерных исследований получена спокойная устойчивая плазма.

Трудно сейчас оценить все практическое значение этого открытия. Та устойчивая плазма, которая уже получена на опыте, имеет еще слишком малую плотность для заметного выхода термоядерной реакции. Но задача, которая до сих пор казалась наиболее трудной, успешно разрешена. Теперь уже не вопрос о неустойчивости становится центральным в термоядерной проблеме, а такие технические задачи, как повышение плотности плазмы, очистка ее от загрязнений и т. п.

Для технического овладения управляемыми термоядерными реакциями физикам и инженерам предстоит еще затратить немало труда. Никто не возьмется сейчас указать срок, когда термоядерная электростанция даст первый ток. Но никто не может усомниться в том, что сделан новый важный шаг в этом направлении.

Термоядерные магнитные ловушки*

Д. А. Панов, Н. Н. Семашко

Реакции слияния ядер легких элементов, например двух ядер дейтерия или ядер дейтерия и трития, сопровождаются выделением огромных количеств энергии. Заманчивая перспектива использования этой энергии для нужд человечества занимает умы многих ученых мира.

Напомним основные моменты, связанные с этой проблемой. Задача заключается в отыскании методов получения высокотемпературной плазмы, т. е. такого состояния вещества, когда газ представляет собой смесь электронов и положительно заряженных ионов, имеющих большую кинетическую энергию. Эти быстрые частицы необходимо удерживать внутри некоторого объема в течение времени, достаточного для того, чтобы заметное число частиц прореагировало между собою. Основная опасность состоит в том, что контакт их со стенками вызовет немедленное охлаждение плазмы и прекращение реакции. Для удержания такого сильно нагретого газа внутри материальной камеры (термоизоляция плазмы) можно использовать магнитные поля. Они ограничивают движение заряженных частиц поперек силовых линий и не позволяют частицам попадать на стенки.

Для того чтобы происходящие процессы были энергетически выгодными, температура плазмы должна быть доведена до сотен миллионов градусов при плотности не менее $10^{13} \div 10^{15}$ ионов в 1 *см*^{3}, а ее объем должен составлять по крайней мере несколько кубометров. Это будут, по-видимому, большие станции, вырабатывающие электроэнергию.

* «Природа», 1959, № 7.

В настоящее время наметилось несколько различных направлений в решении проблемы нагрева и удержания плазмы. Мы рассмотрим одно из направлений исследований, связанное с поисками путей создания плазмы в так называемых магнитных ловушках. В Советском Союзе идея использования магнитной ловушки в виде прямого цилиндра с продольным магнитным полем, усиливающимся к концам, была высказана и обоснована Г. И. Будкером в 1953 г. Для того чтобы разъяснить механизм действия такой ловушки, рассмотрим сначала движение заряженных частиц в неоднородных магнитных полях.

Отражение и дрейф частиц в магнитной ловушке

Известно, что в плоскости, перпендикулярной к магнитным силовым линиям, частицы движутся по окружности. Радиус этих окружностей R пропорционален массе частицы M, составляющей скорости, перпендикулярной к направлению магнитного поля $v_{\perp}$, и обратно пропорционален заряду частицы q и величине магнитного поля H, т. е.

$$R = \frac{Mv_{\perp}}{qH}.$$

Если частица имеет еще компоненту скорости, направленную вдоль силовых линий поля, то в однородном магнитном поле она будет двигаться по винтовой линии с постоянным радиусом и шагом. В неоднородном магнитном поле, возрастающем вдоль направления магнитных силовых линий, шаг винтовой линии по мере проникновения частицы в область сильного поля уменьшается. Это связано с уменьшением продольной скорости частицы, вызванным действием силы, возникающей в поле с непараллельными магнитными силовыми линиями (рис. 1). Напомним, что сила, действующая на заряженную частицу в магнитном поле, так называемая сила Лоренца, перпендикулярна направлениям скорости частицы и линии поля. Так как в нашем случае магнитные силовые линии представляют собой сходящийся пучок, сила Лоренца не перпендикулярна оси винтовой траектории частицы, а имеет составляющую, направленную в сторону слабого поля. Эта составляющая и вызывает торможение продольного движения частицы. При достаточном возрастании поля продольная

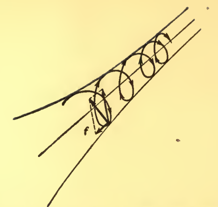


Рис. 1. Действие тормозящей силы f на заряженную частицу в неоднородном магнитном поле

составляющая скорости падает до нуля, и частицы «отражаются» от области сильного поля. Заметим, что точка отражения лежит тем дальше, чем больше была продольная составляющая скорости по сравнению с перпендикулярной при вхождении частицы в область возрастающего поля. В реальных полях невозможно добиться бесконечного возрастания поля, и поэтому частицы, скорости которых составляют с линиями поля угол меньше некоторого, не успевают затормозиться и проходят область усиленного поля не отражаясь.

Допустим теперь, что магнитное поле возрастает в направлении, перпендикулярном к магнитным силовым линиям. В таком поле заряженная частица двигается по траектории с переменной кривизной. Это приводит, как видно из рис. 2, к медленному движению (дрейфу) центра вращения частицы перпендикулярно направлению возрастания поля (градиенту поля) и магнитным силовым линиям. В магнитном поле соленоида неоднородность поля по радиусу по аналогичной причине приводит к дрейфу центров вращения частиц вокруг оси цилиндра.

Магнитное поле ловушки усиливается на концах и обладает осевой симметрией. Следовательно, ионы, двигаясь в ней, будут отражаться от областей усиленного поля, или, как их называют, магнитных пробок, и дрейфовать вокруг оси. Обратим внимание на то, что в ловушке не удерживаются ионы, скорость которых направлена под

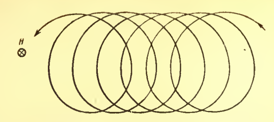


Рис. 2. Дрейф заряженной частицы в неоднородном магнитном поле (в верхней части рисунка магнитное поле меньше, чем в нижней)

углом α к магнитным силовым линиям, меньшим некоторого критического угла $\alpha_{кр}$. Как уже говорилось, тормозящая сила, действующая на частицы в пробках, оказывается при этом недостаточной для отражения. Угол $\alpha_{кр}$ определяется отношением магнитных полей в пробке и в средней части ловушки. Чем больше магнитное поле в пробке, тем меньше угол $\alpha_{кр}$.

Поведение плазмы в магнитной ловушке

Представим теперь себе, что в таком объеме мы создали плазму. Из нее немедленно уйдут те ионы, которые в момент создания плазмы двигались под небольшим углом к силовым линиям поля. Далее, между ионами, оставшимися в ловушке, происходят случайные столкновения, которые приводят к изменению направления их скорости. Если после одного или многих столкновений ион начнет двигаться под малым углом к силовым линиям поля, он уйдет из ловушки. Следовательно, столкновения между ионами приводят к медленному вытеканию плазмы через пробки. Необходимо добиться, чтобы за время, меньшее, чем время существования плазмы в ловушке, заметная доля частиц успела прореагировать между собой. Для этого нужно уменьшить вероятность отклонения на большой угол и увеличить вероятность ядерного взаимодействия при столкновениях. И то и другое достигается увеличением энергии ионов, т. е. температуры плазмы.

В проведенных рядом авторов теоретических расчетах показано, что плазма в магнитном поле ловушки описанного типа может оказаться неустойчивой. Связывается это с тем, что при небольших случайных флуктуациях плотности плазмы или границы плазмы возникают силы магнитного или электрического происхождения, которые приводят

к неограниченному возрастанию этих флуктуаций. Плазма соприкасается со стенками камеры, что влечет за собой ее остывание и уменьшение концентрации ионов. Из-за трудности задачи в упомянутых выше расчетах сделан ряд упрощающих предположений, влияние которых на достоверность полученного результата не всегда удается оценить. Экспериментальное исследование поведения плазмы в магнитных ловушках должно дать ответы на возникающие вопросы.

Методы получения плазмы в магнитных ловушках

До сих пор мы не касались способов создания высокотемпературной плазмы в магнитных ловушках. Это задача чрезвычайно сложная, и многие элементы здесь еще неясны. В настоящее время исследуются два метода получения горячей плазмы: один — это нагрев предварительно созданной в ловушке холодной плазмы, другой — впуск извне и накопление в ловушке высокоэнергетических ионов.

В первом методе используется то обстоятельство, что в возрастающем магнитном поле отношение $mv^2_\perp/H$ остается постоянным. Отсюда следует, что увеличение магнитного поля поднимает кинетическую энергию частиц. Это нетрудно понять из аналогии с трансформатором, где переменное магнитное поле создает вихревое электрическое поле, возбуждающее ток во вторичной обмотке. Так и в нашем случае при возрастании магнитного поля появляются вихревые электрические поля, которые ускоряют ионы. Таким образом, если в ловушке при слабом магнитном поле была создана холодная плазма, то последующий рост магнитного поля будет увеличивать скорость ионов, т. е. температуру плазмы.

В настоящей статье мы рассмотрим более подробно второй способ получения высокотемпературной плазмы — метод накопления.

Получение горячей плазмы путем инжекции и накопления в магнитной ловушке предварительно ускоренных ионов — метод еще мало исследованный. В основных чертах система, в которой его можно осуществить, должна состоять из двух частей: инжектора, где создается и формируется ионный пучок, и собственно ловушки. В инжек-

торе находится ионный источник, помещенный в сильное магнитное поле. В источнике зажигается сильноточный разряд в разряженном дейтерии. Из плазмы разряда злектростатическим полем вытягиваются ионы, которые ускоряются в одном или нескольких ускоряющих промежутках. Получающийся при зтом пучок состоит из смеси ионов D^+, D_2^+ и D_3^+ — атомарных и молекулярных, состоящих из двух или трех атомов. В магнитном поле пучок поворачивается на определенный угол и разделяется на три компоненты, каждая из которых состоит из ионов одного сорта. Молекулярные ионы D_2^+, сформированные в узкий луч, вводятся в магнитную ловушку.

Если извне впустить заряженную частицу в магнитное поле любой конфигурации, то рано или поздно она из него выйдет. Чтобы удержать частицу, необходимо в процессе ее движения в магнитном поле уменьшить радиус кривизны траектории. Такое уменьшение радиуса произойдет, как зто следует из приведенной выше формулы, если уменьшится масса частицы при условии, что ее заряд и величина скорости не изменились. Массу атомарных ионов уменьшить нельзя, и поэтому накопить плотную плазму путем их инжекции в ловушку очень трудно, так как они в ней не улавливаются. Инжекция молекулярных ионов позволяет обойти эту трудность.

Будучи запущенными в ловушку, они из-за случайных столкновений с другими ионами или молекулами газа могут разваливаться (диссоциировать) на атомарные ионы и быстрые нейтральные частицы (процесс записывается так: $D_2^+ \to D_1^+ + D$). Получившиеся атомарные ионы будут продолжать движение с радиусом кривизны, в два раза меньшим, чем у молекулярных ионов, так как скорость в процессе диссоциации почти не меняется. Это обеспечит удержание атомарных ионов в ловушке, что необходимо для накопления плазмы.

Для того чтобы значительная часть молекулярных ионов, инжектированных в ловушку, диссоциировала, длина пробега до диссоциации должна быть меньше длины траектории молекулярного иона до выхода из ловушки. При невыполнении зтого условия лишь незначительная часть молекулярных ионов развалится в ловушке и, следовательно, инжектируемый пучок будет использоваться весьма неэффективно. Большую длину траектории моле-

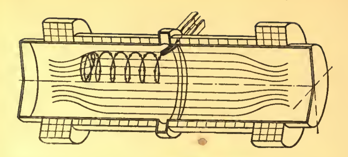


Рис. 3. Схема движения заряженной частицы в магнитной ловушке

кулярного иона можно получить, впуская пучок в объем ловушки через магнитный канал под малым углом к плоскости, перпендикулярной силовым линиям (рис. 3). Магнитный канал представляет собой железный патрубок, в полость которого не проникает магнитное поле ловушки. Ион, выйдя из канала, начинает двигаться по винтовой линии в сторону магнитной пробки. Величина магнитного поля подбирается такой, чтобы винтовая линия пересекала геометрическую ось ловушки. После отражения от магнитной пробки ионы двигаются к противоположному торцу ловушки, снова отражаются и т. д. Благодаря дрейфу вокруг оси ловушки ион при обратном движении после первого отражения не задевает корпуса магнитного канала. После дрейфа на 360° часть ионов погибает, попав на корпус магнитного канала, остальные проходят мимо, продолжая дрейфовать в прежнем направлении. Затем картина повторяется, и после нескольких прохождений мимо магнитного канала практически все молекулярные ионы, не диссоциировавшие по пути, попадают на корпус магнитного канала. Подбирая размер магнитной ловушки, можно сделать длину траектории такого сложного движения настолько большой, чтобы значительная доля инжектированных молекулярных ионов на этом пути диссоциировала. Получающиеся атомарные ионы двигаются с меньшим радиусом кривизны и, дрейфуя вокруг оси, не попадают в область, занятую концами корпуса магнитного канала. Постепенное накопление таких ионов и приводит к появлению в камере ловушки высокотемпературной плазмы.

Процесс накопления ионов в ловушке

Рассмотрим в общих чертах процессы, происходящие при накоплении плазмы в камере ловушки. Как уже говорилось, диссоциация молекулярных ионов приводит к постепенному увеличению плотности атомарных ионов. Последние, сталкиваясь с нейтральными молекулами остаточного газа, могут захватывать при этом электроны. На получающиеся быстрые нейтральные атомы магнитное поле не действует, и они попадают на стенку камеры, проникая в металл. Описанный процесс так называемой перезарядки чрезвычайно сильно ограничивает накопление ионов. На рис. 4 приведен график, характеризующий зависимость плотности плазмы от давления остаточного газа при инжекции молекулярных ионов дейтерия с энергией 200 *кэв*. Из графика видно, что резкий рост плотности плазмы начинается при давлении остаточного газа меньше 10^{-8} *мм рт. ст.* Эта цифра дает представление о том, до какого вакуума должна откачиваться камера. Действительно, если не удастся откачать газ до такого низкого давления, то невозможно получить достаточно плотную плазму с концентрацией $\sim 10^{12}$ ионов в 1 *см*^{3}. Получение столь высокого вакуума в больших металлических объемах представляет собой сложнейшую физико-техническую задачу. Предполагается, что накапливающаяся в объеме плазма сама осуществит откачку газа из вакуумной камеры. Действительно, быстрые ионы плазмы при своем движении ионизируют молекулы остаточного газа. Полу-

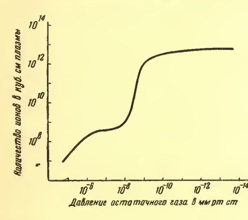


Рис. 4. Зависимость плотности плазмы от давления остаточного газа

чившиеся при этом медленные ионы, перемещаясь вдоль магнитных силовых линий, будут выходить из объема плазмы. Если вне плазмы дополнительно ускорить их до энергии ~25 *кэв*, то, попадая на металл, они будут проникать сквозь его поверхность и задерживаться в ней. Весь процесс в целом приводит к откачке газа из вакуумного объема. Скорость такой откачки, как показывают расчеты, в сотни раз превышает производительность самых больших диффузионных вакуумных насосов.

В процессе накопления плазмы откачка должна справляться с большим потоком газа, поступающим с внутренних поверхностей камеры. Вспомним, что корпус магнитного канала бомбардируется быстрыми молекулярными ионами, не успевшими диссоциировать на своем пути в магнитном поле ловушки. Может оказаться, что бомбардируемая поверхность насытится газом и попадающие на нее ионы не удержатся в ней. В виде нейтральных молекул они начнут возвращаться в объем камеры. Внутренняя поверхность камеры бомбардируется быстрыми нейтральными частицами, образующимися при перезарядке в плазме. В свою очередь, это также может привести к значительному выделению газов из стенок за счет тех газов, которые ранее были адсорбированы на их поверхностях. Для резкого понижения давления остаточного газа в процессе накопления плазмы необходимо, чтобы ионная откачка превысила скорость поступления газа с корпуса магнитного канала и стенок камеры. Проведенные расчеты показывают, что такие условия могут осуществляться, если ток инжекции превышает так называемый ток перевала. Это критическое значение тока обратно пропорционально длине магнитной ловушки и уменьшается при увеличении энергии ионов. Последнее обстоятельство связано с тем, что вероятность перезарядки при столкновении иона с молекулой падает при увеличении энергии ионов. Расчеты показывают, что при длине магнитной ловушки в 10 *м*, диаметре в 1,5 *м* и энергии ионов в 100 *кэв* ток перевала лежит в пределах одного ампера.

Существующие представления о возможности использования инжекции для получения плотной плазмы, представляющей интерес для термоядерного реактора, носят ориентировочный характер. В проведенных расчетах тока перевала сделан ряд допущений, справедливость которых может быть проверена только экспериментально.

Установка «Огра»

Для проведения таких исследований в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова под научным руководством И. Н. Головина была рассчитана и построена большая магнитная ловушка описанного выше типа, известная под названием «Огра». Ее принципиальная схема приведена на рис. 5, а фотография общего вида установки — на рис. 6.

В ионном источнике инжектора создаются ионы дейтерия с энергией до 200 *кэв*. В магнитном поле источника они сепарируются по массам. Молекулярные ионы при помощи специальных магнитных линз формируются в пучок с углом сходимости 5° и через магнитный канал вводятся в камеру ловушки. В магнитном канале витками с током создается поперечное магнитное поле, в котором ионы отклоняются на 20° в сторону магнитной пробки и получают таким образом продольную составляющую скорости. Выйдя из канала, они совершают сложное движение, состоящее из движения по винтовой линии, отражений в пробках и дрейфа вокруг продольной оси магнитного поля, как это уже рассматривалось выше.

Камера ловушки диаметром 1,4 *м*, изготовленная из немагнитной стали, откачивается диффузионными и сорб-

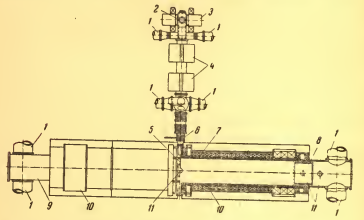


Рис. 5. Схема установки «Огра»

1 — откачка; 2 — источник ионов; 3 — магнит источника; 4 — магнитные линзы; 5 — магнитный канал; 6 — заслонка; 7 — нагреватель камеры; 8—электрод; 9 — камера; 10 — обмотка; 11 — испаритель титана

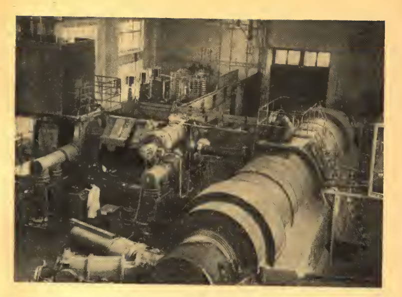


Рис. 6. Установка «Огра»

ционными насосами. В последних производится напыление титана на внутреннюю стенку их корпуса. Образующаяся пленка титана сильно поглощает газы, обеспечивая большую скорость откачки. В камере ловушки установлены испарители титана, позволяющие напылять титан прямо на ее внутреннюю поверхность.

Магнитное поле «Огры» создается соленоидом, на торцах которого стоят дополнительные катушки, создающие увеличенное магнитное поле — магнитные пробки.

За магнитными пробками в вакуумной камере установлены металлические стаканы — электроды. Высокий отрицательный потенциал, подаваемый на электроды, экранируется от плазмы заземленными металлическими сетками. В пространстве между сетками и электродами ускоряются медленные ионы, выходящие из плазмы, и «застревают» в металлических поверхностях стаканов.

В «Огре» представляется возможным получение высокотемпературной плазмы с плотностью 10^{12} ионов в 1 $см^3$. Созданная установка позволит провести широкий круг физических исследований, связанных с проблемой накопления и удержания плазмы в магнитных ловушках.

Синхрофазотрон Дубны*

Доктор физико-математических наук
А. А. Коломенский,

доктор физико-математических наук
М. С. Рабинович

Поиски интенсивных источников частиц большой энергии, столь необходимых для современного физического эксперимента, привели к созданию специальных установок, названных ускорителями. Уже первые их типы по мощности и энергии создаваемого излучения далеко превосходили возможности естественных радиоактивных препаратов. Однако успешное развитие ускорительной техники на протяжении 20—30-х годов, завершившееся созданием циклотрона и бетатрона, сменяется к началу 40-х годов периодом относительного застоя. Созданные к тому времени типы ускорителей исчерпали свои возможности в смысле дальнейшего увеличения энергии ускоренных частиц, достигавшей на этом этапе нескольких десятков *Мэв* для протонов и двухсот-трехсот *Мэв* для электронов.

Между тем, развитие ядерной физики и особенно появление новой ее области — физики элементарных частиц — требовали умения создать в лабораторных условиях пучки частиц все бо́льших энергий. Так, если при изучении ядерных реакций были достаточны энергии бомбардирующих частиц порядка энергии связи нуклонов в ядрах, т. е. 1÷10 *Мэв*, то для опытов по рождению π-мезонов потребовались ускоренные протоны с энергией свыше 300 *Мэв*, а для экспериментов по рождению протон-антипротонных пар — с энергией свыше 5,6 млрд. *эв*.

* «Природа», 1959, № 8.

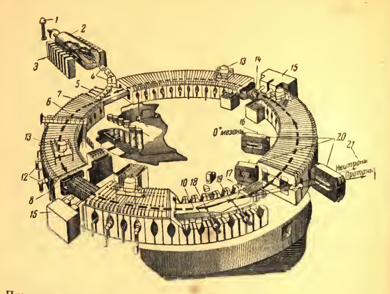
Достижение частицами такой энергии в ускорителях оказалось возможным лишь на основе открытого в 1944 г. советским ученым В. И. Векслером принципа автофазировки частиц.

На основе этой руководящей идеи в последующие годы во всем мире развертывается проектирование и сооружение ускорителей новых типов — фазотронов, синхротронов и синхрофазотронов. Максимальная энергия ускоренных протонов резким скачком возрастает до 680 *Мэв* после окончания наладки советского фазотрона в Дубне и до 3 млрд. *эв* и 6,3 млрд. *эв* после запуска крупнейших в то время американских синхрофазотронов «Космотрона» и «Беватрона». В апреле 1957 г. в Советском Союзе вступил в строй синхрофазотрон с энергией ускоренных протонов 10 млрд. *эв*. До сих пор с такими энергиями физики встречались только в космических лучах. Советская установка является одним из крупнейших действующих ускорителей в мире.

Сооружению синхрофазотрона предшествовала длительная теоретическая исследовательская работа, выполненная в Физическом институте им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР (ФИАН) авторами статьи вместе с сотрудниками. В ходе этих исследований был проведен полный анализ условий движения частиц в ускорителях различных типов и создана теоретическая основа для проектирования и сооружения синхрофазотрона.

Чрезвычайно ценным оказался также опыт сооружения и эксплуатации сравнительно небольших электронных синхротронов — на 30 *Мэв* (1947) и на 250 *Мэв* (1949), созданных в ФИАНе под руководством В. И. Векслера. В дальнейшем, на протяжении 1953—1955 гг., основные теоретические выводы и узлы установки были проверены на специально сооруженной модели синхрофазотрона на 180 *Мэв* в ФИАНе группой сотрудников ФИАНа и Радиотехнического института АН СССР. В частности, при этих исследованиях большое внимание было уделено опасной для ускорения частиц раскачке так называемых фазовых колебаний, неизбежно возникающих в процессе автофазировки частиц.

Сооружение такого ускорителя, как синхрофазотрон в Дубне, которое под силу лишь экономически мощному государству, свидетельствует о том, какое большое внимание уделяется развитию современной науки в Советском



Принципиальная схема синхрофазотрона

1 — каскадный генератор; *2* — линейный ускоритель; *3* — генераторы линейного ускорителя; *4* — система юстировки и поворота пучка; *5* — система ввода; *6* — пучок протонов; *7* — магнит ускорителя; *8* — обмотка магнита; *9* — теплообменники; *10* — вакуумная камера; *11* — форвакуумные насосы; *12* — насосы высокого вакуума; *13* — танки с жидким азотом; *14* — ускоряющие промежутки; *15* — ВЧ-генератор; *16* — ускоряющие электроды; *17* — выводной промежуток; *18* — мишень № 1; *19* — мишень № 2; *20* — магнитные анализаторы

Союзе. По решению Советского правительства установка была передана в распоряжение Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), в работе которого принимают участие 12 стран.

В большом круглом здании — зале № 1 — установлен гигантский кольцевой электромагнит, являющийся сердцем машины. Электромагнит состоит из четырех круговых секций со средним радиусом 28 *м*, разделенных четырьмя восьмиметровыми прямолинейными промежутками. Два из этих промежутков служат для размещения радиочастотных устройств, создающих быстропеременное ускоряющее поле, частота которого строго, с точностью до десятых долей процента, синхронизована с изменяющейся величиной магнитного поля. Один из оставшихся промежутков

используется для ввода предварительно ускоренных до 9 *Мэв* в линейном ускорителе частиц в кольцевую вакуумную камеру, расположенную между полюсами электромагнита. Внутри камеры, имеющей объем около 20 $м^3$, поддерживается рабочее давление, равное $(4\div5)\cdot10^{-6}$ *мм рт. ст*. Вакуумная система откачивается до рабочего давления 56 диффузионно-масляными насосами.

Четвертый прямолинейный промежуток занят устройством для вывода ускоренного пучка.

Магнитное кольцо ускорителя общим весом 36 тыс. *т* покоится на бетонном кольцевом фундаменте, весящем 15 тыс. *т*, который в течение года подвергался специальной выдержке во избежание нежелательных усадочных явлений и деформаций при установке магнита. Круговые секции магнита состоят из 192 блоков, набранных из листов специальной стали толщиной 1 *см*. Максимальный габаритный диаметр магнитного кольца составляет свыше 70 *м*.

Электромагнит синхрофазотрона хотя и велик по своим размерам, но выполнен с исключительной точностью. Для того чтобы охарактеризовать эту точность, укажем лишь, что отклонение одного из секторов магнита по вертикали на 1 *см* привело бы к возникновению колебаний частиц по вертикали с амплитудой порядка 5—6 *см*, что уже нежелательно. Конфигурация магнитного поля, в котором происходит движение частиц, выдерживается с точностью до нескольких десятых процента от заданного значения. В противном случае частицы в своем движении выйдут за пределы рабочей области магнитного поля, попадут на стенку камеры и будут потеряны. Таким образом, в процессе создания этого громадного ускорителя советским ученым, принимавшим участие в его сооружении, пришлось преодолеть значительные технические и технологические трудности. Электромагнит синхрофазотрона, вакуумная камера и электрическая подстанция, питающая электромагнит, были спроектированы коллективом научно-исследовательского института, работавшим под руководством Д. В. Ефремова, Е. Г. Комара, Н. А. Моносзона, А. М. Столова и др. и успешно преодолевшим все возникавшие трудности.

Подстанция, питающая электромагнит, состоит из четырех агрегатов, имеющих суммарную пиковую мощность свыше 140 тыс. *квт* (вдвое больше мощности Волхов-

ской ГЭС). Однако средняя мощность, потребляемая магнитом, существенно меньше и при обычных условиях работы не превосходит 10 тыс. *квт*. Система питания электромагнита расположена в отдельном здании.

Сложнейшие радиотехнические задачи, связанные с созданием ускоряющего поля с заданными параметрами, были блестяще решены группой специалистов Радиотехнического института АН СССР под руководством А. Л. Минца, С. М. Рубчинского, Ф. А. Водопьянова и др.

Достаточно сказать, что при работе установки частота ускоряющего поля изменяется почти в десять раз с точностью соответствия величине магнитного поля в зазоре магнита до 0,1%. Для этой цели специальное устройство непрерывно измеряет значение напряженности магнитного поля в зазоре магнита и подает сигнал, который исправляет значение частоты ускоряющего электрического поля. Кроме того, этой же группой специалистов были решены многие задачи, связанные с автоматическим управлением всем режимом ускорения частиц.

Следует отметить, что вся система управления гигантским синхрофазотроном — дистанционная и осуществляется из отдельного здания, расположенного приблизительно в 300 *м* от здания, где находится синхрофазотрон.

После успешного запуска ускорителя и получения протонов с расчетной максимальной энергией 10 млрд. *эв* в апреле 1957 г. первостепенной задачей было получение проектной интенсивности пучка частиц.

Известно, что американским физикам потребовалось около полутора лет для того чтобы после запуска «Бевытрона» интенсивность ускоряемого в нем пучка достигла запроектированной величины. Между тем, ускоритель Объединенного института ядерных исследований практически в два раза больше этой машины, что значительно увеличивало трудности, стоявшие перед коллективом ученых и инженеров, принимавших участие в запуске и наладке синхрофазотрона. Однако в результате напряженной творческой работы ряда специалистов указанных выше организаций и в первую очередь физиков, инженеров и техников лаборатории высоких энергий ОИЯИ, проведенной под руководством В. И. Векслера, В. А. Петухова, Л. П. Зиновьева, во второй половине 1958 г. интенсивность ускоренного пучка протонов была увеличена в 10 тыс раз. К настоящему времени интенсивность пучка протонов до-

стигла нескольких десятков миллиардов частиц в импульсе. При работе над повышением интенсивности пучка были выявлены и устранены многие явления, возмущавшие движение частиц в ускорителе, в числе которых был ряд весьма тонких явлений резонансного характера. Так, выяснилось, например, что паразитные пульсации магнитного поля с частотой 1200 *гц*, составляющие только 0,01 *эрстед*, или менее 0,001% от основного поля, приводили к потере 80% ускоряемого пучка. Эти потери были устранены при помощи специального программирования амплитуды ускоряющего высокочастотного поля.

Гигантский синхрофазотрон ОИЯИ был сооружен для того, чтобы глубже проникнуть в тайны строения вещества, исследовать структуру элементарных частиц и природу ядерных сил. По законам квантовой механики, с каждой частицей связана так называемая волна де Бройля, длина которой характеризует возможности частицы как инструмента исследования микромира.

В синхрофазотроне дебройлевская длина волны ускоренного протона составляет $2 \cdot 10^{-15}$ *см* (две стомиллиардные доли микрона), в сто раз меньше, чем предполагаемый радиус нуклонов. Значит, на этом ускорителе можно будет исследовать эффекты, связанные со строением нуклонов, что должно иметь весьма важное значение для современной науки.

Проблема ядерных сил, по-прежнему являющаяся одной из центральных проблем физики, по современным представлениям, тесно связана со свойствами мезонов — частиц, масса которых в несколько сот раз превышает массу электрона. Характеристики мезонов, гиперонов, исследование короткоживущих частиц, так называемых «резонансов», взаимодействие частиц с нуклонами, роль различных мезонов в проблеме ядерных сил — это лишь часть того, что должны выяснить проводящиеся в ОИЯИ эксперименты и обработка их данных.

Большой интерес представляет также исследование свойств антипротона и антинейтрона, частиц, предсказанных теоретически задолго до их открытия. Пока уверенно удалось наблюдать только искусственно созданные антипротоны, рождающиеся на мишени ускорителя в паре со своей античастицей — протоном. Максимальная энергия американского «Беватрона», на котором в 1955 г. был открыт антипротон, едва перекрывала необходимое для

этой реакции пороговое значение. Значительно бо́льшая энергия синхрофазотрона позволит получить на нем мощные пучки античастиц и полнее исследовать их свойства, остающиеся еще во многом неясными.

Одновременно с работой по повышению интенсивности ускорителя на нем ставились эксперименты с помощью толстослойных фотоэмульсий, вводимых в камеру. Частицы, вызывающие ядерную реакцию или являющиеся ее продуктом, оставляют в такой эмульсии заметные следы (треки), которые и подвергаются дальнейшей обработке. Уже предварительные опыты показали, что физические процессы, происходящие при столкновении нуклонов, резко зависят от того, как сталкиваются частицы — своими «краями» (периферические соударения) или центрами (центральные соударения). В первом случае образуется небольшое число вторичных мезонов и распределены они резко асимметрично; второй случай характеризуется симметричным распределением мезонов по углу вылета. Полученные данные уже дают богатый материал для физиков-теоретиков и вызывают тем больший интерес, что они в известной степени противоречат уже сложившимся представлениям о множественном рождении частиц в ядерных реакциях.

В экспериментальном зале уже давно работает аппаратура, предназначенная для исследования мезонных пучков, выведенных из камеры ускорителя. В частности, здесь смонтирована камера Вильсона больших размеров ($500 \times \times 150 \times 30$ *см*^{3}), позволяющая наблюдать траектории частиц в поле специального анализирующего магнита, вес которого равен примерно 500 *т*. Другой интересной установкой является управляемая камера, срабатывающая от черенковских счетчиков. Сооружена большая пузырьковая пропановая камера, которая позволяет судить о поведении частицы по пузырькам газа, образовавшимся вдоль ее траектории. При помощи этой аппаратуры сделано уже большое количество снимков, зафиксировано много треков так называемых странных частиц. Заслуживает внимания также жидководородная камера размером 50×35 *см*^{2}, предназначенная для исследования тяжелых K-мезонов. Новые результаты, полученные на синхрофазотроне, доложены на Международной конференции по физике частиц высоких энергий, которая состоялась в июле 1959 г. в Киеве.

Коротко остановимся на новых направлениях, над которыми сейчас работают физики с целью получения ускоренных частиц большой энергии. Одним из таких направлений является применение улучшенного метода фокусировки частиц в ускорителях, получившего название «сильной фокусировки». Этот метод позволяет существенно уменьшить область, внутри которой частицы совершают свое движение, и таким образом снизить вес и размеры ярма электромагнита. Под руководством В. В. Владимирского уже разработан проект большого ускорителя протонов на 50—60 млрд. *эв* с использованием принципа сильной фокусировки[1]. Камера этого ускорителя представляет кольцевую трубу диаметром 15 *см* и длиной около 1,5 *км*.

Существеннейшей характеристикой ускорителя заряженных частиц, наряду с энергией, достижимой в нем, является интенсивность ускоряемого пучка. Получение пучков частиц высокой интенсивности открыло бы совершенно новые перспективы в связи с возможностью осуществления в этом случае экспериментов по соударению встречных пучков. Так, оказывается, что соударение двух пучков протонов с энергией 10 млрд. *эв* эквивалентно соударению протонов с энергией 200 млрд. *эв* с неподвижной мишенью. Соударение встречных пучков электронов с энергией 500 *Мэв* равносильно столкновению электронов с энергией 1000 млрд. *эв* с неподвижной мишенью.

Весьма многообещающим с этой точки зрения является так называемый кольцевой фазотрон, предложенный в 1953 г. авторами данной статьи совместно с В. А. Петуховым. В этом ускорителе принцип сильной фокусировки удалось совместить с преимуществами, даваемыми постоянными во времени магнитными полями. Один из вариантов подобной установки, а именно, так называемый симметричный кольцевой фазотрон, имеет также то дополнительное преимущество, что позволяет производить одновременное ускорение двух встречных пучков одинаковых частиц. Установки такого типа в настоящее время усиленно разрабатываются.

Большой интерес представляют также работы по созданию релятивистского циклотрона с энергией протонов

[1] В настоящее время этот ускоритель сооружается около г. Серпухова. Ускорители с сильной фокусировкой уже работают в Москве на 7 млрд. *эв*, в Женеве и Брукхейвене (США) на 30 млрд. *эв*.— *Прим. ред.*

порядка нескольких сот *Мэв* и интенсивностью в 1000 раз большей, чем та, которая получена в настоящее время. Модель такого циклотрона недавно была создана в ОИЯИ под руководством В. П. Дмитриевского, В. П. Джелепова и Б. И. Замолодчикова.

Наряду с усовершенствованием и дальнейшим развитием уже известных методов ускорения сейчас ведутся интенсивные поисковые работы по изысканию новых методов, основанных на совершенно других принципах.

Не имея возможности сколько-нибудь подробно остановиться на изложении новых методов ускорения, связанных с использованием плазмы, укажем лишь,что на пути практического осуществления этих методов стоит много трудностей, аналогичных тем, которые возникают в настоящее время при создании управляемых термоядерных реакций. В том и другом случае необходимо создавать устойчивое плазменное образование. Однако ясно, что техника получения частиц сверхвысоких энергий движется вперед, и мы будем свидетелями ее новых успехов.

Физика ускорителей*

Кандидат физико-математических наук
В. И. Котов,

доктор физико-математических наук
В. А. Петухов

Последнее десятилетие ознаменовано бурным развитием ускорительной техники. При ее помощи получены элементарные частицы с рекордными энергиями, встречавшимися ранее только в космических лучах. Наряду с действующими космотроном, беватроном (США) и синхрофазотроном Объединенного института ядерных исследований (Дубна, СССР) арсенал экспериментальной ядерной физики пополнился такими гигантскими установками, как протонные ускорители ЦЕРНа (Европейская организация по ядерным исследованиям) и Брукхейвенской национальной лаборатории (США). Космотрон доводит энергию протонов до 3, беватрон до 6, а синхрофазотрон в Дубне до 10 млрд. *эв*, последние же две установки ускоряют протоны до 30 млрд. *эв*.

Физические исследования, проводимые при помощи таких установок, составляют предмет молодой, бурно развивающейся отрасли науки — физики элементарных частиц. В настоящее время известно более 30 элементарных частиц. Получение и систематическое исследование многих из них стало возможно только после того, как в ускорителях был пройден рубеж энергий в 1 млрд. *эв*. Так, в опытах на беватроне были открыты уже давно предсказываемые теорией антипротон и антинейтрон. Научные пои-

* «Природа», 1961, № 6.

ски, проводимые на синхрофазотроне в Дубне, увенчались открытием антисигма-минус-гиперона — положительно заряженной античастицы с массой, превышающей массу протона. Запуск двух последних гигантских ускорителей еще больше расширит фронт научных работ. Предварительные эксперименты, предпринятые на ускорителе в ЦЕРНе, вселяют надежду, что при столь больших энергиях протонов можно будет получать в значительных количествах и исследовать такие редкие частицы и античастицы, число наблюдений которых в настоящее время исчисляется всего лишь единицами. Исследование свойств этих частиц безусловно даст много новых сведений, важных для физики элементарных частиц.

Для чего нужны высокие энергии?

Стремление к получению все бо́льших и бо́льших энергий диктуется требованиями непрерывно расширяющегося горизонта науки. Поток получаемой в этом направлении информации в процессе ее осмысливания неизбежно приводит к постановке все новых и новых проблем, требующих разрешения. На сегодняшний день еще нет подлинной теории элементарных частиц, на основе которой можно было бы получать различные их характеристики. В частности, для построения такой теории требуется осуществить ряд опытов по проверке границ применимости существующих приближений. Возможность проведения подобных экспериментов неизбежно связана с дальнейшим увеличением энергии и интенсивности ускоренных частиц. Эта тенденция в ядерной физике была и остается одним из движущих факторов в развитии ускорительной техники. Каждый шаг в продвижении вверх по шкале энергий в силу возникающих при этом трудностей сопровождается появлением новых кардинальных идей в области ускорителей. Так, в начале 30-х годов переход от диапазона энергий в несколько миллионов электронвольт к десяткам миллионов электронвольт был связан с идеей резонансного ускорения и появлением циклотрона Лоуренса. Скачок к энергиям в сотни и тысячи миллионов электронвольт произошел на основе открытого советским физиком В. И. Векслером и независимо от него американским физиком Мак-Милланом принципа автофазировки. Переход же в область десятков

миллиардов электронвольт стал возможным только после открытия в 1952 г. принципа сильной фокусировки. Гигантские ускорители, о которых говорилось выше,—яркое воплощение всех этих идей.

Роль фокусировки в ускорителях

До недавнего времени реализация принципа автофазировки осуществлялась на базе слабофокусирующих магнитных систем, к которым, в частности, относятся космотрон, беватрон и советский синхрофазотрон. Однако эти системы не позволяют безгранично повышать энергию ускоренных частиц и имеют предел в 10—15 млрд. *эв.* Последующий шаг в увеличении энергии был сделан на базе так называемой жесткой (увеличенной) фокусировки. Типичными образцами таких установок как раз и являются ускорители ЦЕРНа и Брукхейвенской национальной лаборатории.

Итак, что же такое фокусировка и какую роль она выполняет в ускорителях?

Важный элемент в циклических ускорителях — магнитное поле, которое прежде всего служит для получения замкнутых круговых орбит. В результате движения частиц по этим орбитам они могут многократно проходить один и тот же ускоряющий промежуток, постепенно, малыми порциями набирая большую энергию. В крупных установках за время ускорения частицы делают миллионы оборотов, совершая путь в сотни тысяч километров. Очевидно, что пройти такой путь частицы могут лишь в том случае, если отсутствуют какие-нибудь возмущающие явления. В действительности обеспечить идеальные условия для движения частиц невозможно. Несовершенство вакуумной техники, т. е. отсутствие абсолютного вакуума в камере ускорителя, неоднородность магнитных свойств материалов, из которых делают электромагнит, неточности при его сборке и т. п. приводят к отклонению частиц от идеальных (или, как говорят, расчетных) траекторий и могут полностью нарушить их движение. Ускоритель сможет работать лишь в том случае, если будут созданы условия для устойчивого движения частиц. Эти условия должны быть такими, чтобы при всяком малом отклонении частиц от движения по идеальной траектории они не удалялись от этой траектории, а наоборот, стремились вернуться

к ней. Источником сил, возвращающих частицы к идеальной траектории, как раз и является само магнитное поле ускорителя.

Магнитное поле H в ускорителях неоднородно по радиусу и изменяется по определенному закону [1]. Силы, действующие на частицы в радиальном и вертикальном направлениях, пропорциональны смещениям частиц (в этих направлениях) от замкнутой орбиты, а коэффициенты пропорциональности [2] могут быть подобраны так, что отклонившиеся от орбиты частицы будут не удаляться, а совершать около нее колебания, или, как говорят, фокусироваться. Это требование, очевидно, выполняется [3] для обоих направлений, если величина поля слабо спадает по радиусу. В таком поле фокусирующие силы малы, и соответствующие ускорители называют слабофокусирующими. Существенным недостатком слабофокусирующих ускорителей, как уже отмечалось, является то, что они не позволяют ускорять частицы до сколь угодно больших энергий. Действительно, энергия ускоренных частиц в конечном счете определяется произведением величины напряженности магнитного поля на радиус орбиты. Величина индукции в железе ограничена и не может превышать 20 тыс. *эрстед*. Поэтому единственный пока способ повышения энергии заряженных частиц — это увеличение размеров ускорителя. Но с ростом радиуса орбиты, т. е. с увеличением энергии частиц, фокусирующие силы очень быстро уменьшаются. В результате размеры вакуумной камеры ускорителя растут в обоих направлениях пропорционально радиусу, а отсюда вес электромагнита растет приблизительно пропорционально кубу радиуса. Наряду с увеличением веса электромагнита растет, естественно, и потребляемая им мощность; в конечном итоге сооружение ускорителей подобного типа на сверхбольшие энергии (выше 10—15 млрд. *эв*) становится совершенно неприемлемым

[1] $H = \frac{A}{r_n}$, где A — некоторая постоянная величина, r — радиус, n — так называемый показатель поля.

[2] $K_r \sim \frac{1-n}{r^2}$, $K_z \sim \frac{n}{r^2}$.

Если K_r и K_z положительны, то условия фокусировки выполнены.

[3] При условии, что показатель поля n удовлетворяет, с одной стороны, требованию $n < 1$, а с другой, $n > 0$.

и практически, и экономически. Таким образом, проблема повышения энергии ускоренных частиц упирается в необходимость значительного увеличения фокусирующих сил. Если бы каким-нибудь образом удалось существенно улучшить фокусировку, то амплитуда колебаний частиц была бы значительно меньше, а следовательно, размеры ускорительной камеры и вес электромагнита также резко уменьшились бы.

Каким же образом можно улучшить фокусировку?

Представим себе, что в ускорителе создано магнитное поле, резко нарастающее по радиусу. В этом случае показатель поля n будет отрицательным, а по абсолютной величине—большим. Из приведенных выше выражений для фокусирующих сил видно, что в такой установке фокусировка в радиальном направлении значительно улучшится, но зато в вертикальном возникнет столь же большая дефокусировка, и ускоритель работать не будет. Если же создать магнитное поле резко спадающим по радиусу, то тогда, наоборот, частицы хорошо фокусировались бы в вертикальном направлении и столь же сильно дефокусировались в радиальном.

Представим теперь, что мы разрезали, как разрезают торт, электромагниты двух таких неработающих ускорителей на большое число равных секторов. Если теперь в одном из электромагнитов удалить каждый второй сектор и вместо них поставить секторы из второго электромагнита, то окажется, что при определенных условиях вновь собранный ускоритель-гибрид сможет ускорять частицы. В этом случае частицы, двигающиеся по замкнутым орбитам, будут последовательно проходить то фокусирующее, то дефокусирующее магнитное поле, что приведет в конечном счете к устойчивости движения в обоих направлениях, а суммарная фокусировка при этом получится значительно более сильной, чем в обычных слабофокусирующих ускорителях. Устойчивость такого типа можно пояснить еще примером из оптики: при использовании в объективе двух линз с разными по знаку оптическими силами, т. е. фокусирующей и дефокусирующей, объектив при определенных условиях оказывается фокусирующим. При этом фокусирующее действие объекти-

ва, составленного из линз с большими и примерно равными по абсолютной величине оптическими силами, может оказаться значительно лучше, чем фокусирующее действие одной собирающей, но слабой линзы.

Описанный выше принцип фокусировки (так называемой жесткой, или сильной, фокусировки) был открыт в 1952 г. Е. Курантом, М. Ливингстоном и Г. Снайдером. Впоследствии выяснилось, что аналогичные результаты были получены еще в 1950 г. греческим инженером Н. Кристофилосом. Простота ускорителей с жесткой фокусировкой только кажущаяся. Потребовалось 8 лет усиленной работы (теоретической и экспериментальной) во многих лабораториях мира, прежде чем был достигнут успех на ускорителях в ЦЕРНе и Брукхейвене. По своим параметрам и техническому исполнению эти два ускорителя мало отличаются друг от друга, и мы остановимся более подробно лишь на описании синхрофазотрона ЦЕРНа.

Устройство ускорителя ЦЕРНа

Прежде чем приступить к сооружению этой уникальной установки, нужно было провести большую теоретическую работу и произвести множество разработок. В основу были положены все лучшие достижения европейской и международной науки и техники. Основное оборудование изготовлялось в виде прототипов, а затем, после тщательных испытаний и проверок определялись окончательные варианты для серийного производства.

Электромагнит ускорителя состоит из 100 секций, размещенных по кругу радиусом около 100 *м*. Трудность состояла в том, чтобы спроектировать сооружение, нечувствительное к изменениям температуры и движениям грунта. Поскольку ни одна конструкция в принципе не может быть свободной в этом отношении, то в окончательном варианте фундамента отклонения, которые могли бы повлиять на нормальную работу ускорителя, сведены к минимуму. Вся установка расположена в кольцевом подземном тоннеле, в котором непрерывно поддерживается постоянная температура с точностью $\pm 1^\circ$ С. Восемьдесят цилиндрических бетонных столбов диаметром около 2 *м* прочно укреплены в молассской скальной породе по кругу со 100-метровым радиусом. Эти столбы разной длины служат лишь для выравнивания горной породы. Сам же электро-

магнит покоится на тяжелом бетонном кольце сечением около двух метров, которое опирается на столбы. Между кольцом и столбами находятся гибкие муфты, обеспечивающие свободное радиальное движение кольца по отношению к столбам, но являющиеся прочным соединением при возможных вертикальных перемещениях и скручивании. Установка отдельных секций электромагнита производилась с точностью 0,3 *мм* при помощи специальных оптических приборов.

Несмотря на столь большой радиус кольца, вес электромагнита составляет всего лишь 3400 *т*. Отметим попутно, что вес слабофокусирующего магнита с таким же радиусом (т. е. на ту же максимальную энергию) превысил бы 1 млн. *т*. Эти цифры достаточно убедительно говорят о преимуществах жесткой фокусировки.

Но, как всегда бывает, природа ничего не дает даром, и за эти преимущества приходится расплачиваться ценой исключительно высоких требований, предъявляемых к конструкции магнита, точности его сборки и окончательным магнитным характеристикам. Достаточно в качестве примера сказать, что колебания магнитных свойств стали при обычных методах ее выплавки в несколько раз больше того, что можно допустить для магнита ускорителя. Поскольку число стальных пластин, из которых собирается электромагнит, составляет свыше 250 тысяч, то при его сборке удовлетворительной равномерности магнитных характеристик по периметру кольца удалось достигнуть лишь путем соответствующего смешивания пластин, взятых из разных плавок.

Сравнительно малый вес ускорителя определяется малым сечением магнитной дорожки, за пределы которой частицы не имеют права выходить в течение всего времени ускорения (1 сек.). Размеры ее составляют по вертикали 7 *см* и по радиусу 14 *см*. Если учесть, что в процессе ускорения частицы совершают около 500 тыс. оборотов и проходят путь около 300 тыс. *км*, то становится ясной основа тех высоких требований, о которой говорилось. Незначительные отклонения в десятые доли процента в характеристиках магнитного поля могут приводить к сильным резонансным явлениям, полностью нарушающим работу установки. Для того чтобы радиус орбиты оставался постоянным в процессе ускорения, частота ускоряющего электрического поля должна с большой точностью следовать

за изменяющимся во времени магнитным полем ускорителя. Для поддержания нужной точности при изменении частоты используется остроумная система обратной связи по пучку. На периметре ускорителя располагают достаточное число очень чувствительных так называемых пикап-электродов, которые на выходе специальных радиосхем дают соответствующий сигнал, если пучок отклоняется от идеальной орбиты из-за неточности частоты электрического поля. Эти сигналы используются как датчики для внесения соответствующих коррективов, и пучок как бы сам следит за собой, стараясь двигаться по идеальной орбите. Каждые 3 сек. установка дает порцию протонов ($\sim 10^{11}$), ускоренных до энергии 28 млрд. *эв*.

Ускоритель ЦЕРНа — один из первых действующих сильнофокусирующих синхрофазотронов.

В настоящее время обсуждаются и проектируются подобного типа установки на еще бо́льшие энергии. В Советском Союзе под руководством В. В. Владимирского и А. Л. Минца уже разработан проект синхрофазотрона на энергию протонов 50—60 млрд. *эв*. В разных странах мира проектируются и строятся электронные сильнофокусирующие ускорители на энергии 3—7 млрд. *эв*. Кроме того, сильная фокусировка открывает большие возможности создания ряда новых, весьма интересных ускорителей.

Кольцевой фазотрон

В 1953 г. М. С. Рабиновичем и А. А. Коломенским совместно с одним из авторов данной статьи, а двумя годами позднее Саймоном (США) был предложен новый тип сильнофокусирующего ускорителя — кольцевой фазотрон. Для управления движением частиц в этом ускорителе используется не переменное по времени магнитное поле, как в синхрофазотронах, а постоянное. Применение постоянного магнитного поля, помимо ряда технических преимуществ, приводит к существенному повышению эффективности работы установки. Интенсивность пучка ускоренных частиц в кольцевом фазотроне может быть значительно (в 100—1000 раз) увеличена по сравнению с ускорителями с переменным магнитным полем. Прототипом нового ускорителя среди слабофокусирующих установок служит фазотрон. Использование слабой фокусировки приводит к тому, что для ускорения частиц в постоян-

ном магнитном поле необходим сплошной магнит. С ростом энергии вес этого магнита и мощность питания настолько возрастают, что ускорение частиц свыше 1 млрд. *эв* становится практически невозможным. В кольцевом фазотроне этот недостаток отсутствует. Электромагнит состоит из большого числа секторов, магнитные поля в которых попеременно имеют противоположное направление и по абсолютной величине резко нарастают или спадают по радиусу. Благодаря такой конфигурации и достигается жесткая фокусировка. Для ускорения частиц даже до очень больших энергий ускоритель может быть выполнен в виде сравнительно узкого магнитного кольца. Перемена знака магнитного поля приводит к тому, что на одних участках частицы заворачиваются к центру, а на других, наоборот, от центра ускорителя. В соответствии с этим кривизны орбиты в соседних секторах противоположны. В результате знак показателя магнитного поля также периодически меняется, следовательно, при своем движении частицы будут испытывать по каждому из направлений (радиальному и вертикальному) попеременно то фокусировку, то дефокусировку, так же, как в обычном сильнофокусирующем ускорителе.

Модель в Дубне

В настоящее время развитие кольцевых фазотронов находится в стадии создания небольших моделей, которые позволяют проводить всестороннее исследование поведения частиц в подобных ускорителях. В апреле 1960 г. в нашей лаборатории в Объединенном институте ядерных исследований была запущена небольшая модель кольцевого фазотрона. Электромагнит этой установки состоит из 8 пар секторов. Магнитное поле в секторах создается при помощи витков с током, намотанных по определенному закону на поверхностях полюсов электромагнита. Как и в обычных сильнофокусирующих ускорителях, в кольцевом фазотроне требуется выдерживать довольно жесткие допуски на различные параметры. Так, например, смещение секторов в вертикальном направлении на несколько десятых долей миллиметра существенно сказывается на работе модели. Модель предназначена для ускорения электронов. Процесс ускорения в этой модели может осуществляться либо высокочастотным электрическим полем,

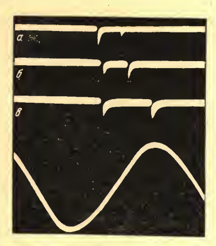


Рис. 1. Импульсы ускоренных электронов в модели кольцевого фазотрона (объяснение в тексте)

как в фазотроне, либо вихревым электрическим полем, как в бетатроне. На рис. 1 приведены осциллограммы импульсов электронов, ускоренных вихревым электрическим полем. Первые импульсы (слева) соответствуют моменту впуска частиц в камеру ускорителя, вторые — импульсы ускоренного пучка. В случаях *а* и *б* зафиксирован пучок промежуточной энергии. Случай *в* соответствует ускорению электронов до конечной энергии, которую способно сообщать вихревое электрическое поле. Нижняя кривая—закон изменения магнитного потока в индукционном сердечнике. Как известно, переменный магнитный поток индуцирует вихревое электрическое поле. В полупериод, когда магнитный поток нарастает, направление электрического поля таково, что оно ускоряет электроны. Во второй полупериод электрическое поле меняет направление на противоположное, и электроны, наоборот, тормозятся. Ускорение электронов происходит, таким образом, импульсно; каждый импульс ускоренных частиц следует в модели кольцевого фазотрона через две тысячные доли секунды. Индукционным методом в установке электроны ускорятся до энергии 450 тыс. *эв*. Путем комбинации этого метода с высокочастотным энергию электронов можно доводить до 2 млн. *эв*. В настоящее время на модели проводятся исследования различных режимов работы ускорителя.

Релятивистский или изохронный циклотрон

Другая интересная разновидность развития идеи жесткой фокусировки — изохронный циклотрон (рис. 2), модель которого недавно была создана также в Объединен-

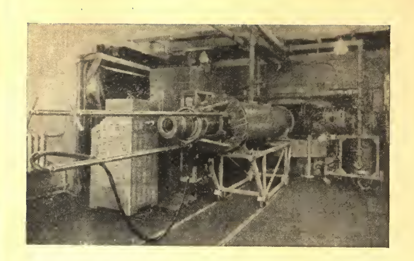


Рис. 2. Общий вид модели изохронного циклотрона

ном институте ядерных исследований под руководством В. П. Дмитриевского, В. П. Джеленова и Б. И. Замолодчикова.

Как известно, циклотрон неизменно привлекал внимание физиков. Помимо своей универсальности, он позволяет получать по сравнению с другими циклическими ускорителями самые большие токи ускоренных частиц (до нескольких миллиампер). Однако ускорять частицы до больших энергий при помощи циклотрона было невозможно. Причина этого — релятивистское возрастание массы ускоряемых частиц, приводящих к нарушению синхронизма в работе циклотрона. Действительно, частота обращения частиц в магнитном поле прямо пропорциональна его напряженности и обратно пропорциональна массе частицы. С увеличением энергии масса частицы растет, и частота обращения в почти однородном и постоянном во времени магнитном поле циклотрона уменьшается, в то время как частота ускоряющего электрического поля остается постоянной. Накапливающаяся разница в частотах приводит в конечном счете к тому, что частицы начинают проходить ускоряющую щель дуантов в такие моменты времени, когда электрическое поле будет уже не ускорять их, а тормо-

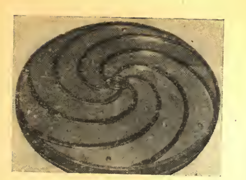


Рис. 3. Полюс электромагнита модели изохронного циклотрона

зить, и дальнейшее ускорение частиц становится невозможным. Величина предельной энергии в циклотроне, обусловленная описанным выше эффектом, составляет для протонов приблизительно 25 млн. *эв*, а для ускорения электронов циклотрон по этой же причине вообще непригоден.

Как же поднять энергию в циклотроне, сохранив при этом все его достоинства? Иными словами, как добиться постоянства частоты обращения частиц, несмотря на возрастание их массы? На первый взгляд кажется, что для этого достаточно создать магнитное поле, растущее по радиусу в соответствии с изменением массы частицы. Однако показатель поля n в этом случае будет отрицательным, и в результате частицы, за счет получающейся при этом дефокусировки в вертикальном направлении, погибнут на стенках камеры прежде чем успеют набрать нужную энергию. Устранить появляющуюся неустойчивость движения частиц оказывается возможным, используя принцип сильной фокусировки в постоянном магнитном поле. Если, например, на полюса электромагнита наложить спиральные стальные шиммы (рис. 3), то зазор между полюсами электромагнита в местах расположения шимм будет меньше, а величина напряженности поля соответственно больше, чем в промежутках между спиралями. Распределение поля по радиусу в таком ускорителе будет иметь вид, показанный на рис. 4, где максимумы поля на кривой соответствуют месту расположения спиралей.

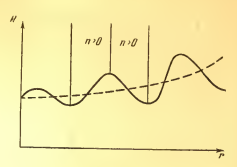


Рис. 4. Распределение поля по радиусу

По одну сторону от спирали поле спадает по радиусу и показатель поля в этой области положителен. По другую сторону от спирали, наоборот, поле нарастает по радиусу и показатель поля отрицателен. Таким образом, частицы, пересекая спирали под малым углом, испытывают попеременно то фокусировку, то дефокусировку, как в обычном сильнофокусирующем ускорителе. В то же время среднее магнитное поле (пунктирная кривая на рис. 4) нарастает по радиусу в соответствии с релятивистским возрастанием массы частицы. Проведенные исследования показали, что при такой конфигурации магнитного поля в циклотроне можно ускорять протоны до энергии, равной приблизительно 1 млрд. *эв*. Конечно, повышение энергии в циклотроне достигается отнюдь не легким путем.

Создание магнитных полей нужной конфигурации представляет довольно сложную техническую проблему. Так, например, для обеспечения синхронизма закон изменения среднего магнитного поля по радиусу должен выдерживаться с точностью до десятых или даже сотых долей процента. Все эти трудности, как показал опыт по сооружению модели нового циклотрона, технически преодолимы. Можно надеяться, что изохронный циклотрон на большие энергии — прибор недалекого будущего.

* * *

Мы кратко охарактеризовали те направления, по которым развиваются современные ускорители частиц. Использование принципа сильной фокусировки позволило значительно продвинуться вверх по шкале энергий и

интенсивностей. Однако сейчас уже ясно, что этот принцип дает возможность повысить энергии ускоренных частиц приблизительно лишь в десять раз по сравнению со слабофокусирующими ускорителями. Это связано с тем обстоятельством, что с ростом энергии точность поддержания различных параметров в сильнофокусирующем ускорителе резко увеличивается и в конце концов выходит за пределы технических возможностей.

За последнее время советскими учеными В. И. Векслером, Г. И. Будкером выдвинуты принципиально новые идеи в разработке методов ускорения заряженных частиц. Какие возможности таят в себе эти методы, пока говорить рано, но несомненно, что в ближайшие годы физика ускорителей достигнет новых успехов и будут получены мощные пучки частиц еще более высоких энергий.

* * *

Дополнение при корректуре

С момента написания статьи прошло уже более трех лет. На первый взгляд это совсем небольшой срок. Однако в науке три года поисков и разработок приводят не только к ощутимому накоплению фактов, но и вносят также свои коррективы в оценку возможностей различных методов, намечают и утверждают в «правах гражданства» новые пути развития. Для физики ускорителей накопление фактов — это ввод в действие новых установок и результаты тех исследований, которые проводятся в процессе их проектирования, наладки, запуска и эксплуатации.

За последние годы вошли в строй такие крупные ускорители, как сильнофокусирующий синхрофазотрон на энергию протонов 7 млрд. *эв* Института экспериментальной и теоретической физики (СССР), слабофокусирующий протонный ускоритель на энергию 12,5 млрд. *эв* и сильнофокусирующий электронный синхротрон на энергию 6 млрд. *эв* (США) и др. Созданная в Институте экспериментальной и теоретической физики установка является моделью сооружаемого под Серпуховом синхрофазотрона на энергию протонов 70 млрд. *эв* со средним радиусом магнитного кольца около 200 *м*. В то же время эта

модель является самостоятельным ускорителем, эффективно используемым для исследований в области физики высоких энергий.

Неуклонно продвигаются в область высоких энергий также линейные электронные ускорители. В стадии запуска находится установка на энергию электронов 2 млрд. *эв* Харьковского физико-технического института, являющаяся в настоящее время одной из самых мощных среди линейных ускорителей. В Станфорде (США) начато строительство линейного ускорителя-гиганта на энергию электронов 20—40 млрд. *эв*. Общая длина этой установки составит около 4 *км*.

Существенные успехи достигнуты и в области ускорителей с постоянными во времени магнитными полями. Можно сказать, что учеными уже пройден путь от создания и исследования различного рода моделей (две из них — кольцевой фазотрон и изохронный циклотрон — были описаны выше) до завершения проектов больших установок. Исследования, предпринятые в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (Дубна), завершились созданием проекта изохронного циклотрона на энергию протонов 700 *Мэв*. Проект аналогичной установки, а также проект кольцевого фазотрона на энергию протонов 12,5 млрд. *эв* разработаны в США. Эти установки называют «мезонными фабриками», так как они будут способны давать в тысячи раз более интенсивные потоки мезонов по сравнению с обычными ускорителями на такую же энергию.

Какие же направления дальнейшего развития ускорителей определились за последнее время? Выше говорилось, что принцип сильной фокусировки дает возможность повысить энергии частиц приблизительно в десять раз по сравнению со слабофокусирующими ускорителями. В 1961 г. это мнение, распространенное среди ученых, было вполне оправданным. Однако опыт, накопленный при создании сильнофокусирующих установок, успехи в области техники и более пристальное изучение проблемы с учетом всех последних достижений, приводят к выводу, что данный принцип может быть использован для ускорения частиц вплоть до энергий в 1000 млрд. *эв*.

На Международной конференции по ускорителям высоких энергий, проходившей в Дубне в августе 1963 г., сообщалось о проектах ускорителей на энергии протонов

300 млрд. *эв* (США, ЦЕРН), 500 и 1000 млрд. *эв* (СССР). Эти гигантские ускорители мыслятся состоящими из двух кольцевых установок. Малый сильнофокусирующий ускоритель доводит энергию частиц до 10—20 млрд. *эв* и является как бы инжектором по отношению к основной установке с радиусом до нескольких километров. В инжекторе пучок формируется (пучок обладает очень малыми поперечными размерами и малым разбросом энергии) и вводится в большое кольцо, где и ускоряется до сотен миллиардов электронвольт. Благодаря малым поперечным размерам вводимого пучка камера большого кольца может быть сделана с минимальным сечением. Стремление к уменьшению сечения камеры естественно, так как при огромных размерах большого кольца даже незначительное его увеличение приводит к ощутимому возрастанию веса и потребляемой мощности питания электромагнитов.

Указанное обстоятельство — не единственный аргумент в пользу двухступенчатой схемы ускорительной установки. Если инжектировать частицы в большое кольцо непосредственно, например из линейного ускорителя, сообщающего протонам энергию в несколько сотен миллионов электронвольт, то начальное магнитное поле в установке составляло бы всего лишь несколько десятков эрстед. При таком уровне магнитного поля поддерживать его характеристики в требуемых пределах практически было бы невозможно.

Таким образом, описанная схема ускорителя является экономически и технически наиболее оптимальной и позволяет, не выходя за рамки хорошо известных принципов (автофазировка, сильная фокусировка), ускорять частицы до нескольких сот миллиардов электронвольт. Возможность продвижения в область еще бо́льших энергий (до 1000 млрд. *эв* и выше) при технически выполнимых допусках заложена в идее автокоррекции, высказанной А. Л. Минцем, А. В. Васильевым, Э. Л. Бурштейном, Э. М. Рубчинским и одним из авторов данной статьи. При этом схема установки остается также двухступенчатой, а информация, получаемая от самого пучка, в этом случае используется для исправления характеристик магнитного поля и ускоряющей системы.

Как мы видели на примере синхрофазотрона ЦЕРН, в сильнофокусирующих ускорителях принцип автокор-

рекции частично уже используется для поддержания нужного закона изменения частоты ускоряющего поля. Другие же параметры ускорителя, в частности характеристики магнитного поля, поддерживаются в нужных пределах благодаря жестким условиям, накладываемым на изготовление и сборку установки. Авторы идеи автокоррекции обнаружили возможность получения информации о всех этих важнейших характеристиках ускорителя по пучку и разработали принципиальную схему автоматического управления ими. Для этого в процессе ускорения пучок периодически подвергается возмущению, приобретая направленное движение, характер которого определяется параметрами магнитного поля. Система пикап-электродов, расположенная по периметру ускорителя, фиксирует такое возмущенное движение. Сигналы с этих электродов поступают на вход счетно-решающего устройства, где обрабатываются, и на основе полученной информации вычислительная машина сама отдает команду, в каких элементах электромагнита ускорителя и насколько нужно исправить те или иные параметры.

Разработанные проекты поражают своей грандиозностью, но за этой грандиозностью скрываются экономические факторы, побуждающие к поискам различных косвенных путей повышения энергии ускоренных частиц более дешевыми средствами.

Одним из таких направлений, успешно развиваемым как в Советском Союзе, так и в США, Италии, Франции, ЦЕРНе, является метод встречных пучков. Идею этого метода легко понять, если рассмотреть кинематику столкновения двух частиц, движущихся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями. В этом случае одна из частиц выполняет роль мишени, а другая на нее налетает. Какой же силы удар получит частица-мишень при встрече с частицей-снарядом? В обычных явлениях, окружающих нас, например при столкновении двух биллиардных шаров, летящих навстречу друг другу, ответ известен каждому. Шар испытывает удар в два раза сильнее по сравнению со случаем, когда он покоится, а другой на него налетает. Однако данное положение справедливо лишь при скоростях движения, значительно меньших скорости света. Для скоростей, близких к скорости света, в соответствии с законами теории относительности, выигрыш получается значительно бóльшим. Так, например, при

встрече двух электронных пучков с энергией частиц в каждом всего лишь 200 млн. *эв* эквивалентная энергия для случая покоящейся мишени превышает 150 млрд. *эв*.

Из приведенного примера видно, что идея встречных пучков с энергетической стороны весьма заманчива. Однако для ее реализации приходится преодолевать немало трудностей, связанных главным образом с необходимостью создания устойчивых встречных пучков большой плотности. Действительно, в условиях обычного эксперимента, при неподвижной мишени, в 1 $см^3$ мишени содержится приблизительно 10^{22} ядер, в то время как в мишени — пучке, непосредственно ускоренном в ускорителе, частиц в миллиарды раз меньше, чем в твердой мишени. Поэтому, чтобы приблизиться к условиям нормального эксперимента, приходится заставлять частицы повторно взаимодействовать друг с другом, многократно возвращая их к месту встречи. Но даже и при этих условиях эффект очень мал, и поэтому приходится накапливать частицы в соответствующих установках, называемых накопительными кольцами.

В настоящее время в Италии, США, Советском Союзе и ЦЕРНе проводится всестороннее изучение различных режимов такого накопления, и в недалеком будущем можно ожидать интересных результатов, касающихся, в частности, структуры самих элементарных частиц.

Содержание

В глубь атома
Сборник статей

Утверждено к печати
редколлегией научно-популярной литературы Академии наук СССР

Редактор издательства *Ш. Е. Воловник.* Художник *В. Прохоров*
Технические редакторы *Г. Астафьева, И. Макогонова*

Сдано в набор 25/III 1964 г. Подписано к печати 17/XI 1964 г. Формат $84\times108^1/_{32}$.
Печ. л. 12,25+1 вкл. Усл. л. 27,88. Уч.-изд. л. 19,0 (18,9+0,1 вкл.). Тираж 40 000.
Т-17409. Изд. № 2478. Тип. зак. 401. Темплан МПЛ 1964 г. № 32.

Цена 58 коп.

Издательство «Наука», Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография издательства «Наука», Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

58 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»